

Conception et Contrôle d'un périphérique dédié à la simulation couplée kinesthésique et tactile

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 05 Janvier 2012

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université Lille1 Sciences et Technologies

(spécialité génie électrique)

par

Tao ZENG

Composition du jury

Directrice de thèse :	Betty Lemaire-Semail	Professeur à l'Université Lille1
Co-encadrant :	Frédéric Giraud	MDC à l'Université Lille1
Rapporteurs :	Christine Prella	MDC HDR à l'Université de Technologie de Compiègne
	Vincent Hayward	Professeur à l'Université Pierre et Marie CURIE
Examinatrice :	Marie-ange Bueno	Professeur à l'Université de Haute-Alsace

Remerciements

Trois années de travail au sein du laboratoire L2EP ont permis d'aboutir à ce mémoire, trois années au cours desquelles de nombreuses personnes ont apporté leurs connaissances et leur soutien. Je tiens à remercier toutes ces personnes qui, de près ou de loin ont permis de concrétiser ce travail.

En premier lieu, je tiens à remercier Betty Lemaire-Semail, ma directrice de thèse, et Frédéric Giraud, pour leur disponibilité, leur écoute et leurs conseils tout au long de cette thèse. Je remercie Michel Amberg pour m'avoir apporté les moyens techniques durant ces trois années.

J'adresse également mes remerciements à Christine Prella et Vincent Hayward pour leurs rapports sur cette thèse, ainsi que le membre du Jury, Marie-Ange Bueno.

Je remercie chaleureusement Romuald Vanbellegem, Simon Cassar, Zheng Dai, Gaston M'Boungui, Razvan Chitic, Thanh hung Nguyen et Yi Yang pour les échanges riches et nombreux, pour m'avoir apporté de nouvelles compétences et avoir partagé à un moment ou un autre l'évolution de mes travaux.

J'ai par ailleurs beaucoup apprécié le support technique et la sympathie de l'atelier électronique du P2, Olivier Ferla, et de l'atelier mécanique de Politech'Lille, Yohann Dhondt.

J'adresse aussi toute ma sympathie à mes amis qui ont été amenés à faire les tests psychophysiques.

Pour terminer, je remercie mes parents pour m'avoir toujours soutenu malgré les difficultés et sans qui je n'aurais jamais pu réussir mes études.

*Je dédie cette thèse
à ma famille.*

Table des matières

Introduction générale	1
1 Etat de l'art	5
1.1 Introduction	6
1.2 Présentation de l'haptique	6
1.2.1 Les propriétés du toucher	7
1.2.1.1 Biomécanique du toucher	7
1.2.1.2 Physiologie Sensorielle (Somesthésie)	8
1.2.1.3 Le toucher actif et le toucher passif	9
1.2.2 La sensibilité kinesthésique	10
1.2.3 La sensibilité tactile	10
1.2.4 Critères et besoins du domaine haptique	13
1.2.5 Applications du retour haptique	14
1.3 Les systèmes à retour haptique	15
1.3.1 Le retour kinesthésique	16
1.3.2 Le retour tactile	17
1.3.3 Couplage kinesthésique et tactile	19
1.3.3.1 Simulation de la forme	20
1.3.3.2 Simulation de la texture	25
1.3.3.3 Simulation de la souplesse	27
1.3.3.4 Simulation du glissement	28
1.4 Objectifs de la thèse	30
1.5 Conclusion du chapitre	30
2 Modèle de mouvement d'une plaque à retour de forme	33
2.1 Introduction	33
2.2 Principe et contexte	34
2.2.1 Les descripteurs de forme	34

TABLE DES MATIÈRES

2.2.2	La psychophysique de la forme	36
2.2.3	Comment reconstituer la sensation de forme?	38
2.2.4	Contexte : travaux de Wijntjes et al.	39
2.3	Caractérisation du modèle de mouvement à retour de forme	41
2.3.1	Modélisation de la forme virtuelle	42
2.3.2	Trois modèles de mouvement de la plaque plane	44
2.3.2.1	Modèle de mouvement sans compensation	45
2.3.2.2	Modèle de mouvement avec compensation de la vitesse	45
2.3.2.3	Modèle de mouvement avec compensation de la position	48
2.4	Conclusion	52
3	Conception et évaluations du dispositif à retour de forme	53
3.1	Introduction	54
3.2	Conception du dispositif à retour de forme	54
3.2.1	Détermination et spécification du cahier des charges	54
3.2.2	Réalisation du dispositif	55
3.3	Commande du système	57
3.3.1	Interprétation du contrôle par le concept de “HIL”	57
3.3.2	Structure de commande	60
3.3.3	Estimation de la position du doigt en utilisant le capteur de force	65
3.4	Evaluations psychophysiques de la simulation de forme	66
3.4.1	Expérience 1 : première évaluation de la performance du dispositif	67
3.4.2	Expérience 2 : mesure du seuil différentiel de la courbure en utilisant une référence plate	70
3.4.3	Expérience 3 : comparaison des trois modèles du mouvement et la condition réelle	75
3.4.4	Expérience 4 : comparaison de la forme simulée et de la forme réelle à l’aide du JNDs	80
3.4.5	Discussion général sur les expériences	83
3.5	Conclusion	84
4	Couplage kinesthésique et tactile	87
4.1	Introduction	88
4.2	Principe et contexte de la simulation de texture fine	88
4.2.1	La psychophysique de la rugosité	88
4.2.2	Comment obtenir des illusions de surfaces texturées?	90
4.2.3	Stimulation vibrotactile et effet “squeeze film”	90

4.2.4	Travail de Biet et al.	91
4.2.5	Simulation de texture fine par la transformation spatio-temporelle	93
4.3	Conception et contrôle du dispositif couplé kinesthésique et tactile	94
4.3.1	Conception du dispositif de couplage tactile-kinesthésique	95
4.3.2	Contrôle du dispositif de couplage tactile-kinesthésique	96
4.4	Couplage kinesthésique et tactile pour simuler des textures larges	97
4.4.1	Principe de la restitution de texture large à profil d'ondulation	98
4.4.2	Modélisation de la texture large couplée kinesthésique et tactile	98
4.4.3	Mise en œuvre expérimentale	101
4.4.3.1	Expérience 1 : correspondance entre les textures larges simulées et réelles	101
4.4.3.2	Expérience 2 : comparaison des deux modèles avec la condition réelle à l'aide du JNDs	106
4.4.3.3	Discussion générale	108
4.5	Conclusion du chapitre	110
5	Conclusion générale	111
	Annexe A : Calcul de la vitesse du point de contact	115
	Annexe B : Calcul de la vitesse du point de contact dans le modèle du mouvement avec compensation de la position	117
	Annexe C : Présentation graphique des résultats du seuil différentiel	119
	Bibliographie	121
	Résumé	131
	Abstract	133

TABLE DES MATIÈRES

Table des figures

1.1	Influences du système kinesthésique et tactile (inspiré de [LT01])	9
1.2	Vue en coupe de la pulpe du doigt et les mécanorécepteurs encapsulés (représentation de [PAF+04])	11
1.3	Illustration des éléments clés de l’interaction entre un système de rendu haptique et un utilisateur humain (inspiré par [CT04])	16
1.4	Des exemples de dispositifs à retour kinesthésique. (a) le <i>PHANToM</i> [Sen], (b) l’ <i>OMEGA</i> [FD], (c) le <i>Falcon</i> [Nov]	17
1.5	Exemples de dispositifs tactiles de type “matrices de picots” (représentation de [YKSK07] [KKKS06] [Hay04])	18
1.6	Interface tactile à onde acoustique de surface (SAW) (représentation de [KTM07])	18
1.7	a). Le <i>T-PaD</i> [WGCP07]; b). Le <i>Stimtac</i> [BGLS07].	19
1.8	Le <i>TeslaTouch</i> basé sur l’électrovibration en contrôlant l’attraction électrostatique entre une surface tactile et le doigt de l’utilisateur [BPIH10].	19
1.9	a). Déformation normale du bout du doigt lors de l’exploration. b). Reconstitution de la zone de contact en fonction du déplacement [Hay04].	20
1.10	(a, c) La liaison sphérique à servocommande. (b, d) Le doigt posé sur la plaque [Hay04].	21
1.11	a). Déformation du bout du doigt. b). Méthode pour simuler la forme [Hay04].	21
1.12	a). Le <i>Pantograph</i> avec l’espace de travail plan. b). Système de détection de la force avec des encodeurs de haute résolution [Hay04].	22
1.13	a). Un doigt glisse sur une crête d’échelle millimétrique (0,5mm de haut). b). Vue de la peau et des crêtes dermiques. c). Les régions de la peau en compression sont représentées par des segments plus sombres, tandis que les régions d’étirement sont représentées par des segments clairs [Hay04] [LH03].	22
1.14	a). L’ensemble à deux dimensions d’actionneurs piézoélectriques. b). Le système réalisé avec une surface active de 1cm ² [Hay04].	22
1.15	a). Le schéma conceptuel du dispositif. b). La mise en œuvre finale du premier prototype [CFM+05].	23

TABLE DES FIGURES

1.16	Dispositif électro-tactile connecté à l'effecteur du <i>PHANToM</i> [SKKT07a] [SKKT07b].	24
1.17	Présentation de la forme d'un engrenage par l'intégration électro-tactile et kinesthésique [SKKT07a].	24
1.18	Exemple de dispositif couplé tactile-kinesthésique utilisant une matrice de picots sur un bras de robot [WPF ⁺ 05].	25
1.19	L'interface tactile de type picot-tableau monté sur <i>ViSHaRD 10</i> . a). <i>VirTouch Mouse</i> . b). L'adjonction <i>VirTouch Mouse</i> sur <i>ViSHaRD 10</i> [FEB06].	26
1.20	Couplage de l' <i>Ubi-Pen</i> à l'interface haptique <i>PHANToM Omni</i> [KL09].	26
1.21	Conception du dispositif intégré kinesthésique et tactile. a). Le matrice de picots pour réaliser la simulation normale à la peau. b). Le mécanisme pour le retour de force latérale à 2 DDL [KSKK04].	27
1.22	a). La structure de la matrice de valves pneumatiques. b). L'adjonction l'actionneur pneumatique sur l'effecteur du <i>PHANToM</i> [KOR06].	27
1.23	a). Description de l'interface CASR [BSR00]. b). Le système couplé tactile et kinesthésique [SBGB10].	28
1.24	Le dispositif à retour de glissement monté sur le bras de sortie d'un <i>PHANToM</i> [WMVO05].	29
1.25	Le dispositif à retour de glissement et cisaillement en utilisant deux disques [BFBH07].	30
2.1	La définition des descripteurs de forme : La position, l'orientation locale et la courbure locale (inspiré de [PKK99]).	35
2.2	la représentation schématique des trois catégories de stimuli géométriquement différentes pour simuler la forme : les formes du second ordre (stimuli courbe), les formes de premier ordre (stimuli trapézoïdale), et les formes d'ordre zéro (stimuli rectangulaires). Les propriétés géométriques de chaque stimulus sont décrites sur le côté droit (inspiré de [PKK99]).	35
2.3	Illusion de bosse ou de trou sur un plan par ajout de forces de propulsion/réaction (d'après [RDLTH01]).	38
2.4	Les quatre conditions. L'observateur ressent la courbure par, (a) l'information géométrique d'ordre zéro uniquement, (b) l'information géométrique de premier ordre, (c) les deux informations combinées. La quatrième condition (d) est celle d'un solide réel. Sa géométrie est représentée en (e) [WSHK09].	40

2.5	Le dispositif pour produire les stimuli de la forme. Lors de l'exploration, le doigt déplace la surface de contact E guidé latéralement par un roulement linéaire à faible frottement. Le codeur B mesure le déplacement horizontal utilisé pour calculer une forme représentée par la hauteur et/ou la pente. Le servo-mécanisme C contrôle l'élévation et le servo-mécanisme D contrôle la pente [WSHK09]. . . .	40
2.6	a). Toucher actif en déplaçant un doigt en avant et en arrière le long d'une plaque plane. La perception de courbure est effectuée par la rotation d'une plaque en se maintenant toujours tangente à une forme virtuelle au point de contact. b). La forme à représenter.	42
2.7	modèle de forme haptique.	42
2.8	L'évolution de la position angulaire de la plaque plane. Les points $M_1 - M_5$ sont des positions successives du doigt sur la plaque.	44
2.9	Illustration de la vitesse du point de contact au cours de l'exploration.	45
2.10	Exemples de vitesses relatives entre le doigt et la surface à explorer.	46
2.11	Evolutions de la vitesse du point de contact sur les composantes x et y en fonction de la position du doigt.	47
2.12	Evolution de la position angulaire de la plaque plane dans le modèle de mouvement avec compensation de la vitesse.	48
2.13	Illustration de la différence entre le point de contact sur la plaque et le point à correspondant sur la forme réelle.	49
2.14	Illustration de la compensation de position. La ligne pointillée représente la position de la plaque dans le modèle de mouvement sans compensation, la ligne continue représente la plaque dans le modèle de mouvement avec compensation de la position. La position du point de contact coïncide avec celle du point à restituer.	49
2.15	Evolution de la position angulaire de la plaque plane suivant le modèle de mouvement avec compensation de la position.	51
2.16	Evolution de la vitesse du point de contact selon les composantes x et y dans le modèle de mouvement avec compensation de la position.	51
3.1	Vue du dispositif. A est une plaque plane ; B est un capteur de force sur 6 axes ; C sont deux <i>Novint Falcons</i> ; D est un ordinateur de bureau.	56
3.2	a) La force du doigt sur l'axe tangentiel et sur l'axe normal ; b) Eléments considérés pour la modélisation du doigt.	58
3.3	La représentation causale de l'interaction doigt-objet selon l'axe tangentiel.	58
3.4	La représentation causale de l'interaction doigt-objet selon l'axe normal.	58
3.5	La représentation HIL de l'interaction doigt-effecteur selon l'axe normal.	59

TABLE DES FIGURES

3.6	Schéma de contrôle du système entier.	60
3.7	Boucle de contrôle.	62
3.8	Estimateur de la vitesse.	62
3.9	Evaluation de la mesure de la vitesse avec la transformation de <i>Tustin</i>	64
3.10	Evaluation du contrôle. La ligne bleu est la consigne de la position sur l'axe x , la ligne rouge le déplacement réel du <i>Falcon</i>	64
3.11	Contrôle de la plaque à partir de deux <i>Falcons</i>	64
3.12	Définition de la force et du couple à mesurer. U est la position du doigt. F_x et F_z représentés en lignes pointillées sont les forces qui s'appliquent par le doigt sur la plaque au point de contact. F_x et F_z représentés en lignes solides sont les forces mesurées par le capteur. T_y est le couple sur l'axe y . H représente la distance entre la plaque et le plan de référence du capteur.	65
3.13	Stimuli pour l'expérience 1. Les cinq formes courbées à profil circulaire ont respectivement les mêmes courbures que cinq formes virtuelles simulées par le dispositif conçu.	68
3.14	Interface expérimentale. La consigne demandée aux sujets est "Indiquez laquelle est la plus convexe".	72
3.15	Un exemple représentatif de points de données et la fonction psychométrique associée.	74
3.16	Seuils différentiels individuels pour tous les sujets. Le seuil moyen et l'erreur standard sont indiqués.	74
3.17	a). Les neuf formes réelles dont une est la forme étalon et huit sont les formes de comparaison. Les formes sont fabriquées en PVC et recouvertes d'une couche de film mince. b). Une paire de formes réelles présentées aux sujets. L'un est l'échantillon étalon et l'autre échantillon de comparaison.	76
3.18	Les seuils de discrimination moyens dans les quatre conditions. Les barres d'erreur représentent un intervalle de confiance à 95%.	78
3.19	Fraction de Weber pour la discrimination de la courbure pour tous les sujets dans quatre conditions. Les résultats moyens sont aussi représentés.	78
3.20	Stimuli pour l'expérience 4. L'échantillon étalon est la forme réelle.	81
3.21	Un exemple représentatif de biais entre la courbure de la forme étalon et la courbure de la forme rendue.	82
3.22	Biais individuel et moyen pour huit sujets. La barre d'erreur indique l'erreur standard.	82
4.1	Profil approximatif d'un doigt quand les crêtes épidermiques sont prises en compte (d'après [Bie06]).	92

4.2	L'épaisseur du film d'air à un instant donné et profil spatial de la pression moyenne temporelle sous le doigt (d'après [Bie06]).	92
4.3	L'amplitude de vibration mesurée par le vibromètre LASER (d'après [Bie06]).	93
4.4	Principe de modulation d'une surface crantée et rugueuse par la transformation spatio-temporelle.	94
4.5	Vue de dessus et de dessous de la plaque tactile. a) Le résonateur mécanique ; b) Les céramiques piézoélectriques.	95
4.6	Couplage de la plaque tactile et du dispositif à retour de forme.	96
4.7	Le principe du contrôle du système couplé kinesthésique et tactile. Il synthétise le contrôle de la plaque tactile à retour de forme et le contrôle de la plaque tactile à retour de texture.	96
4.8	Représentation des contrôles simultanés de la plate-forme et de la plaque pour la reconstitution de forme et de texture	97
4.9	Illustration du modèle de rendu de texture large par l'effet kinesthésique seul.	99
4.10	Illustration du contact et de la force entre le doigt et la texture large. a). Le côté "monrée" ; b). Le côté "descente".	100
4.11	Illustration du modèle de rendu de texture large par l'effet couplé kinesthésique et tactile.	100
4.12	Stimuli pour l'expérience 1. La série d'échantillons réels présentés a la même amplitude et différentes périodes. L'autre série d'échantillons réels avec amplitude variable et période fixe n'est pas présentée ici.	102
4.13	a). Les deux séries d'échantillons réels. Pour chaque série, l'un des échantillons est la texture large étalon et les huit autres les textures larges de comparaison. b). Une paire de textures larges réelles présentées aux sujets dont l'une est l'échantillon étalon et l'autre l'échantillon de comparaison.	107
4.14	Les seuils différentiels pour les huit sujets et le seuil moyen. Ces résultats sont obtenus pour la discrimination d'amplitude.	109
4.15	Les seuils différentiels pour les huit sujets et le seuil moyen. Ces résultats sont obtenus pour la discrimination de période.	109

TABLE DES FIGURES

Liste des tableaux

3.1	Spécifications techniques du <i>Novint Falcons</i>	57
3.2	Résultats d'évaluation : pourcentage des réponses correctes des ressemblances entre les formes virtuelles et les formes réelles.	69
4.1	Pourcentage des réponses de correspondance selon l'amplitude. Les textures larges simulées sont générées par l'effet kinesthésique seul.	104
4.2	Pourcentage des réponses de correspondance selon l'amplitude. Les textures larges simulées sont générées par l'effet kinesthésique et tactile.	104
4.3	Pourcentage des réponses de correspondance selon la période. Les textures larges simulées sont générées par l'effet kinesthésique seul.	104
4.4	Pourcentage des réponses de correspondance selon la période. Les textures larges simulées sont générées par l'effet kinesthésique et tactile.	105

Introduction générale

Ce travail a été réalisé au sein de l'équipe Commande du Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP). Il rentre dans le cadre du projet STIMTAC soutenu par l'IRCICA (Institut de Recherche sur les Composants logiciels et matériels pour l'information et la Communication Avancée) qui vise à développer de nouveaux stimulateurs tactiles. Il rentre aussi dans le cadre de l'équipe-projet MINT (Méthodes et outils pour l'interaction à gestes) de l'INRIA-LNE. Ce travail a pour but la réalisation d'un périphérique capable de produire des retours d'informations kinesthésiques et cutanées, c'est-à-dire la reproduction des sensations de toucher virtuel.

Lorsque nous travaillons dans un environnement virtuel, nous utilisons principalement les retours d'information visuelle et auditive. Cependant, grâce à des technologies issues de la simulation et de la téléopération, il est aujourd'hui possible d'entrer en contact physique avec des objets du monde virtuel par des interfaces homme-machines qui peuvent transmettre mais aussi restituer des informations réalistes de nature kinesthésique ou cutanée (tactile). Il existe au niveau commercial quelques périphériques à plusieurs degrés de liberté assurant le retour d'effort kinesthésique. Les technologies employées sont soit actives (électromagnétiques), soit passives (fluides électro ou magnéto-rhéologiques). En ce qui concerne le retour d'informations cutanées, les dispositifs les plus répandus sont de type "Braille", à savoir des matrices de picots mus par effet piézoélectrique.

La combinaison des effets kinesthésiques et cutanés est une sensation particulièrement difficile à simuler. Cependant, lors d'un geste de toucher, de préhension ou de maintien d'un objet courant, l'Homme ressent à la fois la texture fine de l'objet, sa résistance à la pression et également sa réaction thermique. Dès lors, un couplage des fonctions kinesthésique et tactile est nécessaire à la constitution d'un périphérique haptique réaliste. Les applications potentielles sont très nombreuses, de la simulation médicale à la vente par correspondance, en passant par le domaine des jeux.

La présente étude traite de la conception, de la réalisation et du contrôle d'un dispositif dédié à la simulation couplée kinesthésique et tactile. Plus précisément, l'interface que nous proposons est à même de présenter une information haptique à l'utilisateur, c'est-à-dire un retour

de toucher au niveau des ressentis kinesthésique et tactile. Ici, le retour “kinesthésique” s’attache à la simulation de forme, et le retour “tactile” à la simulation de textures. Alors, dans cette étude, “la simulation couplée kinesthésique et tactile” se réfère spécialement au “couplage de simulation de forme et de textures”. Pour cela, nous proposons un dispositif constitué d’une plateforme capable d’assurer un positionnement ou des efforts selon 3 DDLs et d’une plaque tactile à retour de texture. L’intégration simultanée de ces deux entités couplées dans un dispositif compact doit permettre de stimuler correctement la pulpe de la peau en contact avec la surface virtuelle. C’est-à-dire qu’elle doit restituer tout ou partie des efforts agissant sur le doigt si celui-ci touchait vraiment la surface simulée.

Les recherches bibliographiques sur le domaine haptique menées dans le premier chapitre nous conduisent à rédiger une synthèse des aspects psychophysiques, neurophysiologiques et biomécaniques impliqués dans le toucher. Nous proposons par la suite une classification des systèmes à retour haptique : le retour kinesthésique, le retour tactile et le retour couplé kinesthésique et tactile. Nous donnons également de nombreux exemples de simulateurs adaptés à cette classification, en particulier pour les simulateurs couplés kinesthésique et tactile du point de vue fonctionnel. Les avantages et inconvénients des simulateurs présentés sont discutés.

Si le stimulateur couplé tactile-kinesthésique que nous proposons permet d’envisager un retour kinesthésique diversifié, nous l’exploitons essentiellement pour la restitution de forme. A cette fin, dans le second chapitre, nous explicitons l’approche suivie pour la simulation de forme. L’idée est d’orienter, élever et déplacer une plaque plane en sorte que cette plaque soit toujours tangente à une forme virtuelle au point de contact, en respectant l’orientation locale de la surface qui est le descripteur dominant pour le retour de forme. Cette approche permet le toucher actif et dynamique, c’est-à-dire que l’utilisateur déplace librement son doigt le long de la surface de la plaque. Nous proposons trois modèles de mouvement de cette plaque à retour de forme. Ce sont le modèle de mouvement sans compensation, le modèle de mouvement avec compensation de la vitesse et le modèle de mouvement avec compensation de la position.

Dans le troisième chapitre, nous explicitons la réalisation d’une plateforme à trois degrés de liberté pour contrôler la position de la plaque plane. Nous utilisons pour cela deux *Novint Falcon* ; un *Novint Falcon* est une interface haptique à retour de force avec trois degrés de liberté. Par rapport aux autres interfaces haptiques commerciales, il offre une solution à faible coût pour les développeurs. Pour mesurer la position du doigt, un capteur de force/couple placé au-dessous de la plaque plane est employé. Il permet de calculer la position du doigt au point de contact à partir de la force et du couple générés par le doigt. Ce type de capteur de position est donc compact.

Dans le même chapitre, nous effectuons quatre expériences sensorielles, destinées à évaluer la plateforme conçue et comparer les trois modèles de perception de forme. Ces évaluations

psychophysiques montrent que la plateforme est capable de reproduire distinctement plusieurs formes courbées à travers l'exploration d'une surface continue, et que le modèle de mouvement avec compensation de la position possède le plus petit seuil différentiel dans le test du JND ("Just Noticeable Difference").

Le dernier chapitre a pour objectif le couplage kinesthésique et tactile. En premier lieu, nous concevons une plaque tactile à frottement variable basée sur les travaux fait préalablement au laboratoire pour la reproduction de textures fines. Par la suite, nous intégrons cette plaque tactile et la plateforme dans un dispositif couplé kinesthésique et tactile qui nous permet de reproduire simultanément la sensation de forme et la sensation de texture fine. Pour tester la performance de ce couplage, nous utilisons le dispositif pour simuler des textures larges à profil d'ondulation sinusoïdale, dont l'ordre de grandeur est millimétrique en amplitude et centimétrique en période. Le retour simultané tactile et kinesthésique s'avère alors bénéfique dans la reconnaissance des textures larges même si son apport dans la discrimination des caractéristiques de ces mêmes textures reste discutable.

Chapitre 1

Etat de l'art

Sommaire

1.1	Introduction	6
1.2	Présentation de l'haptique	6
1.2.1	Les propriétés du toucher	7
1.2.1.1	Biomécanique du toucher	7
1.2.1.2	Physiologie Sensorielle (Somesthésie)	8
1.2.1.3	Le toucher actif et le toucher passif	9
1.2.2	La sensibilité kinesthésique	10
1.2.3	La sensibilité tactile	10
1.2.4	Critères et besoins du domaine haptique	13
1.2.5	Applications du retour haptique	14
1.3	Les systèmes à retour haptique	15
1.3.1	Le retour kinesthésique	16
1.3.2	Le retour tactile	17
1.3.3	Couplage kinesthésique et tactile	19
1.3.3.1	Simulation de la forme	20
1.3.3.2	Simulation de la texture	25
1.3.3.3	Simulation de la souplesse	27
1.3.3.4	Simulation du glissement	28
1.4	Objectifs de la thèse	30
1.5	Conclusion du chapitre	30

1.1 Introduction

Dans le domaine de la réalité virtuelle, la mise en situation écologique des utilisateurs nécessite l'utilisation d'interfaces homme-machine capables de transmettre mais aussi restituer des informations réalistes. Lorsque ces périphériques restituent des informations physiques liées au toucher, de nature kinesthésique (effort sur les doigts) ou cutanée (tactile), on aborde le domaine de l'haptique.

Le stimulateur à concevoir est une interface dite à "retour haptique", c'est-à-dire qu'elle permet d'interagir physiquement avec un des objets d'un monde virtuel. Les interfaces à retour haptique restituent les sensations dues aux forces de contact, à la dureté ou au poids, ainsi que les sensations cutanées qui sont elles liées à la perception d'un état de surface ou du glissement. L'objectif de ce travail est de proposer une nouvelle interface qui puisse reproduire la sensation de toucher, tout au moins au niveau des ressentis kinesthésiques et tactiles.

Dans la première partie du chapitre, nous introduisons le domaine de l'haptique, afin de présenter succinctement le cadre de cette étude. Nous allons d'abord décrire les propriétés du toucher, au niveau biomécanique et somesthésique. Puis, nous étudierons précisément les sensibilités kinesthésique et tactile liées au sens du toucher. Egalement, les critères et besoins du domaine haptique sont décrits, ainsi que ses applications.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous verrons les systèmes à retour haptique. Comme la sensation haptique est classée en deux types, les systèmes à retour haptique peuvent être classés en deux familles : le retour kinesthésique et le retour tactile. Particulièrement, nous soulignerons l'importance du couplage kinesthésique et tactile. Enfin, nous nous intéresserons à l'état de l'art des dispositifs haptique, classés selon la tâche qu'ils permettent d'accomplir.

1.2 Présentation de l'haptique

L'haptique désigne la science du toucher, par analogie avec l'acoustique ou l'optique (provient du grec "aptomai" qui signifie "je touche"). Le sens du toucher (haptique) joue un rôle crucial dans notre perception du monde et notre habileté dans l'identification, la manipulation, et les tâches de préhension. La sensation haptique se fait sentir à travers une variété de modalités. Par exemple, les humains souvent appuient, frottent ou saisissent des objets lors de l'exploration. La sensation du toucher peut être divisée grossièrement en deux catégories basées sur le récepteur qui acquiert l'information sensorielle. Une catégorie correspond à la sensation kinesthésique, qui est acquise par les propriocepteurs qui existent dans le muscle, les tendons et les articulations. L'autre type est la sensation tactile, qui est acquise par des mécanorécepteurs qui existent à une profondeur de moins un millimètre de la surface de la peau.

1.2.1 Les propriétés du toucher

Le toucher est l'un des cinq sens (les autres sont l'odorat, le goût, la vision, et l'audition) à travers lequel les animaux et les humains découvrent le monde autour d'eux. Dans le contexte de neurobiologie le toucher est défini comme "le sens particulier par lequel le contact avec le corps d'un organisme est perçu dans l'esprit conscient" [Gar10]. Le sens du toucher permet à un individu de déterminer la taille, la forme, le poids, la texture et la température d'un objet, et de percevoir aussi la douleur ou le plaisir provoqué par l'objet. De cette façon, le toucher permet à un individu de se renseigner sur l'environnement et de changer son comportement en conséquence. En plus des informations sur les objets extérieurs, les récepteurs du toucher permettent d'obtenir des informations internes liées aux os, aux muscles et autres tissus. Par rapport aux autres sens qui sont localisés principalement dans un seul endroit (les yeux, la langue), la sensation du toucher (ou le contact avec le monde extérieur) peut être située partout sur le corps, depuis le sommet de la tête à la pointe de l'orteil.

1.2.1.1 Biomécanique du toucher

Les aspects biomécaniques du toucher concernent la mécanique du contact, la transmission des signaux mécaniques à travers la peau, et leur transduction en influx nerveux par les mécanorécepteurs.

Quand on touche un objet, la source de toutes les informations haptiques est la distribution spatio-temporelle des contraintes mécaniques sur la peau à l'interface de contact. La relation entre ces charges et les contraintes et déformations dans les terminaisons nerveuses mécanoréceptrices de la peau joue un rôle fondamental dans le codage neuronal des informations haptiques. Les charges, telles que la pression, le déplacement, dépendent des propriétés géométriques et matérielles des deux entités en contact, ainsi que de l'ensemble des forces d'interaction. Bien que la détermination de l'état de la contrainte ou de la déformation d'un mécanorécepteur ne soit pas strictement possible à l'heure actuelle, des modèles mécaniques de la peau et des tissus sous-cutanés permettent la production d'hypothèses testables sur les déformations de la peau et les réponses neuronales. La vérification des hypothèses peut alors être réalisée en comparant les résultats calculés à partir des modèles avec des données biomécaniques sur la déformation de la peau et des tissus sous-cutanés, et les données neurophysiologiques des réponses des fibres nerveuses.

Pour comprendre les caractéristiques des propriétés mécaniques du toucher humain, Gulati et al. [GS95] ont utilisé un robot à 2 DDL, qui s'appelle "Tactile stimulateur", pour délivrer des stimuli statiques et dynamiques au bout du doigt de l'homme. Trois types d'indenteur (une pointe, une baguette circulaire, et une plaque plane) ont imposé des stimuli. La vitesse de la rampe des stimuli variait de 1 à 32mm/sec. La profondeur a été augmentée de 0,5mm à 3,0mm

(avec la résolution de $20\mu m$). Les fréquences sinusoïdales augmentées de $0,125Hz$ à $16Hz$ à des amplitudes de $0,25$ et $0,5mm$. Les forces résultantes normales et de cisaillement ont été mesurés par un capteur de force à 2-axes. L'analyse des données acquises a clairement montré que le bout du doigt manifeste un comportement mécanique non linéaire et viscoélastique.

Le stimulateur tactile à 2 DDL a aussi été utilisé pour fournir la rampe de déplacement en cisaillement à différentes profondeurs de l'indentation du bout du doigt par une plaque plane en aluminium [LS99]. Les résultats montrent que pour chaque profondeur de l'indentation, le déplacement en cisaillement a d'abord causé l'augmentation de l'étirage de la peau et de la force de cisaillement, suivie par le glissement de la plaque sur la surface de la peau. La relation entre le déplacement en cisaillement et la force de cisaillement a été quasiment linéaire. Le glissement s'est produit à environ $3mm$ de déplacement en cisaillement à toutes les vitesses. La vitesse faible tend à provoquer un phénomène de stick-slip (comme indiqué par la force de cisaillement oscillatoire au cours de glissement), alors que la force de cisaillement a diminuée légèrement pour des vitesses plus élevées.

En résumé, la pulpe du doigt peut être caractérisée par une raideur non linéaire et une relaxation importante au court du temps [GS95] [SMR97] [PH99]. La peau se comporte donc localement comme un corps viscoélastique.

1.2.1.2 Physiologie Sensorielle (Somesthésie)

La définition de la somesthésie est la conscience d'avoir un corps et la capacité de sentir le contact avec son environnement. Elle désigne un ensemble de différentes sensations, telles que la chaleur, la douleur, la pression, etc. Ces sensations sont élaborées à partir des informations fournies par de nombreux récepteurs sensitifs du système somatosensoriel, situés dans les tissus de l'organisme (peau, tendons, articulations, viscères ...). Comme le toucher fournit des informations qui nous permettent d'identifier des objets, de percevoir une texture, de détecter des propriétés mécaniques, ou de ressentir du plaisir ou la douleur, le toucher implique deux types de sensibilités : l'une proprioceptive et profonde appelée sensibilité kinesthésique, se rapportant à un ressenti de phénomène physique atteignant l'intérieur du corps ; et l'autre extéroceptive et superficielle que l'on appelle communément sensibilité tactile (cutanée) [LL86]. La sensation kinesthésique est acquise par les propriocepteurs qui existent dans le muscle, les tendons et les articulations. La sensation tactile est acquise par les mécanorécepteurs qui existent à une profondeur de quelques millimètres sous la surface de la peau.

Selon la nature de la tâche effectuée, ces deux systèmes influent de manière plus ou moins prononcée dans la médiation du ressenti haptique [LT01]. Comme le montre la figure 1.1, le système kinesthésique intervient de manière plus prononcée lors des tâches de manipulation et de communication, tandis que le système cutané intervient plutôt lors de situation d'identification

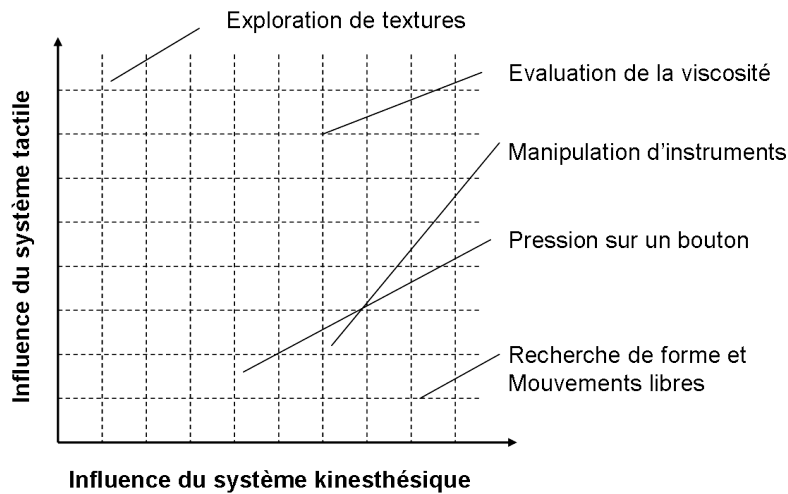


FIGURE 1.1 – Influences du système kinesthésique et tactile (inspiré de [LT01])

ou de discrimination de surface, pour évaluer des phénomènes à petite échelle.

Le toucher est également associé à la sensibilité à la température (thermoception) et à la douleur (nociception). Cependant, La thermoception et le nociception ont leur propre canal d'information et de transmission et doivent être traitées de manière "spéciale" bien qu'il y ait des interactions possibles avec les autres sous-systèmes de la somesthésie [Gre04].

Le codage de ces informations somesthésiques s'effectue grâce à une population de récepteurs sensoriels périphériques qui peuvent être classés selon le type de stimulus. On distinguera donc les mécanorécepteurs qui enregistrent toute déformation mécanique (vibration, étirement, pression), situés par exemple dans la peau, dans les muscles, les thermorécepteurs qui permettent de ressentir la température et les nocicepteurs sensibles à la douleur.

1.2.1.3 Le toucher actif et le toucher passif

Le toucher actif et le toucher passif, respectivement avec et sans mouvement volontaire de la part du sujet, sont fréquemment rapportés comme équivalents en termes de capacités perceptives. Le toucher actif se produit lorsque les gens déplacent leurs doigts et leurs mains pour explorer les propriétés de l'objet. En revanche, le toucher passif ne comporte pas de mouvement des mains et des doigts. Les stimuli sont tout simplement impressionnés sur la peau.

Gibson [Gib62] a assimilé le toucher passif avec ce qui est plus souvent appelé "la perception tactile". C'est la perception fondée uniquement sur la stimulation des sens cutanés d'un observateur immobile. Par contre, en plus de l'information cutanée à la disposition des observateurs passifs, l'observateur actif a une information kinesthésique, ainsi que la capacité de contrôler la collecte de l'information.

1.2.2 La sensibilité kinesthésique

L'information kinesthésique se réfère aux données géométriques et cinétiques des membres, telles que la position et la vitesse des articulations, les forces d'actionnement qui sont principalement transmises par les récepteurs sensoriels qui se trouvent dans les muscles, les articulations et les tendons [BSR00]. Les récepteurs pour les sensations kinesthésiques sont des récepteurs sensoriels spéciaux appelés propriocepteurs. La capacité de percevoir des sensations kinesthésiques est possible lorsque les propriocepteurs transmettent des signaux au système nerveux central où ils sont traités dans la région somatosensorielle du cortex cérébral. De plus, outre les propriocepteurs, les récepteurs de la peau participent également en partie à la perception du retour kinesthésique [Bur99]. La bande passante de ces capteurs est située entre 20 et 30Hz.

Nous pouvons par ailleurs distinguer le *retour extéroceptif* du *retour proprioceptif*. Le premier concerne la mesure et la perception des phénomènes extérieurs au corps humain (chocs, poids et raideur d'un objet) alors que le second concerne les phénomènes internes à son propre corps (position des membres, verticalité du corps).

1.2.3 La sensibilité tactile

L'information tactile (cutanée) se réfère aux distributions de pression et d'indentation, à la fois dans l'espace (sur la peau) et dans le temps, et est transmise par des mécanorécepteurs innervant le derme et l'épiderme du bout du doigt. La sensation tactile est essentielle pour de nombreuses tâches de manipulation et d'exploration. Au cours du toucher, les humains peuvent percevoir les formes et les textures complexes d'une surface par les quantités physiques telles que la pression, les vibrations de glissement l'étirement et la température. A partir de cette information tactile, nous pouvons comprendre les caractéristiques de l'objet et nous pouvons le manipuler avec précision.

Les mécanorécepteurs cutanés : Pour mieux comprendre la sensibilité tactile, il est nécessaire de connaître les fonctionnements des mécanorécepteurs cutanés. Quatre types de mécanorécepteur encapsulés ont pour fonction d'informer le système nerveux sur le toucher, la pression, la vibration et la distension de la peau. Ce sont les corpuscules de Meissner, les corpuscules de Pacini, les disques de Merkel et les corpuscules de Ruffini (Figure 1.2). Ensemble, ils constituent les mécanorécepteurs dits de bas seuil (ou à sensibilité élevée) étant donné qu'ils émettent des potentiels d'action pour de très faibles stimulations mécaniques de la peau. Tous les mécanorécepteurs de bas seuil sont innervés par des fibres myélinisées de relativement gros calibre qui assurent une transmission rapide des informations tactiles. De nombreuses communications ont proposé des caractérisations du rôle et de la sensibilité des organes terminaux de Meissner, Pacini, Merkel et Ruffini. Les résultats des travaux de Johnson

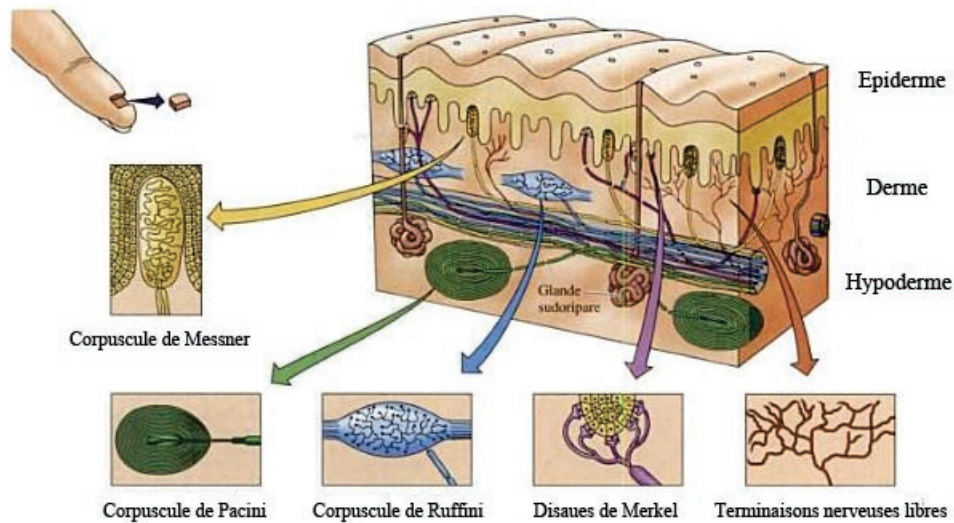


FIGURE 1.2 – Vue en coupe de la pulpe du doigt et les mécanorécepteurs encapsulés (représentation de [PAF⁺04])

et de ses collègues [JH92] [Joh01], mais aussi de l'équipe de Johansson [JV83] [VJ84] constituent de bonnes références sur le sujet, dont les résultats sont généralement acceptés.

- **Les corpuscules de Meissner.** Ces mécanorécepteurs sont situés entre les papilles dermiques immédiatement sous l'épiderme des doigts, des paumes et des plantes des pieds. Les corpuscules de Meissner sont les plus communs des mécanorécepteurs de la peau glabre. Ils sont particulièrement sensibles aux vibrations d'assez basse fréquence ($30 - 50Hz$), telles qu'en produit le glissement d'objets texturés sur la peau. Ils sont insensibles aux stimuli statiques mais sont bien performants pour les contraintes dynamiques. Ces transducteurs biologiques ne répondent qu'à des stimuli de faible profondeur et ont une faible acuité spatiale bien qu'ils soient nombreux.

- **Les corpuscules de Pacini.** Ces mécanorécepteurs sont de grandes terminaisons encapsulées dans les tissus sous-cutanés. Il existe environ 300 corpuscules de ce type par doigt et 800 dans la main. Ces récepteurs diffèrent des corpuscules de Meissner par leur morphologie, leur distribution et leur seuil de réponse. Ils sont impliqués dans la discrimination de textures superficielles fines ou de stimuli mobiles provoquant des vibrations à haute fréquence ($250 - 350Hz$) de la peau. Du fait de leur adaptation rapide, les corpuscules de Pacini et de Meissner renseignent principalement sur les aspects dynamiques des stimuli mécaniques.

- **Les disques de Merkel.** Ces mécanorécepteurs sont situés dans l'épiderme où ils

se disposent dans l'alignement des papilles dermiques, en dessous des crêtes dermiques. Ils représentent environ 25% des mécanorécepteurs de la main et leur densité est particulièrement élevée à l'extrémité des doigts, sur les lèvres et sur les organes génitaux externes. Les disques de Merkel jouent un rôle important dans la discrimination statique de formes, de bords et de textures rugueuses. Leurs réponses sont indépendantes de la force d'application (précontrainte) dans le sens où ils sont surtout sensibles aux déviations de l'uniformité spatiale. Ainsi, ils sont très sensibles aux arêtes, aux coins, à la courbure, à l'orientation des objets et seraient majoritairement responsables de la perception du relief de la texture. Ils répondent aussi de manière forte et soutenue à l'étirement latéral et peuvent permettre de distinguer la direction de glissement.

- **Les corpuscules de Ruffini.** Ces mécanorécepteurs se situent dans la profondeur de la peau ainsi que dans les ligaments et les tendons. Leur grand axe est généralement orienté parallèlement aux lignes d'étirement de la peau et ils sont ainsi particulièrement sensibles aux étirements de la peau que produisent les mouvements des doigts ou des membres. Ils répondent mieux à l'étirement d'ensemble de la peau que les disques de Merkel, mais sont moins précis spatialement, et beaucoup moins sensibles à l'indentation normale. Ils répondent principalement aux stimuli d'origine interne.

Ces quatre types de mécanorécepteurs sont généralement regroupés en fonction de leurs propriétés dynamiques, c'est-à-dire leur temps d'adaptation nécessaire pour recevoir une autre information, et la taille de leur champ récepteur (de type I pour des champs récepteurs de petite taille aux limites bien définies et de type II pour des champs récepteurs de grande dimension aux frontières mal localisées). Dans la littérature les disques de Merkel, les corpuscules de Ruffini, les corpuscules de Meissner et les corpuscules de Pacini sont appelés respectivement SAI (slowly-adapting), SAI, RA (rapidly-adapting), PC (pour pacinian) ou encore SAI, SAI, FAI (fast-adapting), FAI [JV83] [VJ84]. Cette dernière terminologie précise mieux l'étendue spatiale du champ.

Sensibilité aux stimuli : Dans la plupart des études sur le seuil de sensibilité par toucher-pression sur la peau glabre des doigts, la peau a été stimulée par des indentations normales. Plusieurs facteurs influent sur les seuils de détection de ces stimuli. Par exemple, la fréquence de l'indentation, la taille de la zone stimulée, la présence d'une pré-indentation, et les caractéristiques répétitives de la stimulation sont connues pour affecter le seuil. La plupart des seuils de détection rapportés dans la littérature pour les indentations de la peau se situe entre 4 à 15 μm [JV79]. Toutefois, si le stimulus est superposé à une pré-indentation et comprend une oscillation

mécanique à haute fréquence ($100 - 300Hz$), des seuils autour d'une fraction de micromètre ont été observés dans certaines conditions [Ver71].

En termes de largeur et profondeur des stimuli candidats à la sensation, Johansson et al. [JL83] ont mesuré les seuils de détection de la hauteur d'une pointe en toucher actif et trouvé des seuils de détection moyens respectifs de 1.09 , 2.94 , et $5.97\mu m$ pour des pointes de diamètre 602 , 231 , et $40\mu m$. LaMotte et al. [LW86] montrent par méthode microneurographique que pour un point de $550\mu m$ de diamètre, le canal RA (les corpuscules de Meissner) répond au-dessus de $2\mu m$, le SAI (les disques de Merkel) au-dessus de $8\mu m$. Une rainure de $0.06\mu m$ de profondeur ($44\mu m$ de largeur) peut être détectée lorsqu'elle est caressée par le bout du doigt à une vitesse de $10mm/s$ grâce aux corpuscules de Pacini [LS91]. En termes d'acuité spatiale du système sensoriel, [TDT05] montre qu'elle est aussi très dépendante du type de stimuli. De plus, elle varie en fonction de la partie du corps : environ $1mm$ sur les lèvres, la langue et le bout du doigt à $40mm$ sur le dos ou le ventre ; mais aussi avec l'âge, de 1 à $4mm$ pour l'extrémité du doigt. En termes de sensibilité aux vibrations continues, [BGVC88] a trouvé que le seuil de détection humain issu d'études psychophysiques pour la détection des vibrations d'un simple indenteur est d'environ $28dB$ donnée en décibels pour un signal à l'amplitude crête à crête de $1\mu m$ et à la fréquence de 0.4 à $3Hz$. Il décroît de $-5dB/octave$ entre 3 à $30Hz$ puis de $-12dB/octave$ entre 30 et $250Hz$.

1.2.4 Critères et besoins du domaine haptique

Comme nous l'avons dit précédemment, l'information sensorielle haptique de la main en contact avec un objet peut être divisée en deux classes : (1) des informations tactiles, émanant de la peau en contact avec l'objet ; (2) des informations kinesthésiques, se référant à la position et au mouvement des membres ainsi qu'aux forces associées. En général, les forces de contact sont détectées par les deux systèmes, mais la force spatio-temporelle variable avec la région de contact est transmise par le système tactile seul. Par conséquent, la forme fine, la texture, ainsi que le glissement de l'objet par rapport à la peau, sont détectés par les capteurs tactiles dans la peau. Les autres propriétés des objets telles que les formes larges, les textures grossières ou les compliances élastiques qui nécessitent le mouvement de la main ou du bras pour l'exploration sont transmises par le système kinesthésique.

Les capacités sensorielles tactiles sont les plus aiguës sur la pulpe du doigt. La localisation spatiale d'un point est détectable à $0,15mm$ [Loo79] et la résolution spatiale entre deux points est d'environ un millimètre. Sur une surface lisse, même une texture de $0,06$ micron de haut est détectable [LS91]. Au niveau vibratoire, le système tactile est sensible à une fréquence maximale de $1kHz$, avec un optimum de sensibilité à environ $250Hz$, fréquence pour laquelle des amplitudes inférieures au micron sont détectables [BGVC88].

D'un autre côté, en terme de rotation, la résolution kinesthésique est d'environ 2 degrés pour le doigt en proximal-distal et le poignet, et environ 1 degré pour l'épaule [SBH99]. La résolution de positionnement du bout des doigts est de l'ordre de 0,5 à 2,5mm lors d'une tâche de saisie d'objets dont la taille est d'un ordre de grandeur compris entre 1 et 80mm [HS96] [DDW+89]. La résolution en vitesse et en accélération du bout du doigt, mesurée en terme de Just Noticeable Differences (seuils différentiels), est environ 11% et 17% des valeurs de référence, respectivement [BS96].

Le contrôle des conditions de contact dépend également de la nature de la décision du toucher : chez l'homme, ce contrôle peut revêtir la forme d'un réflexe rapide d'étirement musculaire avec un temps de réponse d'environ 30ms, d'un réflexe spinal (environ 70ms), ou d'une action délibérée relativement lente [SB97]. La bande passante de l'homme pour les mouvements des membres se trouve être une fonction de la tâche à accomplir : 1–2Hz pour les signaux imprévus, 2–5Hz pour les signaux périodiques, jusqu'à 5Hz pour les trajectoires générées ou acquises en interne, et environ 10Hz pour les actions réflexes [Bro90]. Il a également été observé que les humains peuvent produire des actions, telles les roulements de tambour, à plus de 40Hz en permettant par exemple à la baguette de tambour de rebondir grâce à un contrôle approprié de l'impédance passive de l'articulation de la main [HSH97].

Au niveau des efforts, la force maximale contrôlable qui peut être exercée par un doigt est d'environ 50 à 100N, selon que seuls les muscles des doigts sont autorisés à être activés ou que les muscles de l'épaule peuvent aussi être utilisés [TSEC94]. Cependant, les forces typiques utilisées dans l'exploration et la manipulation d'un objet sont de l'ordre de 5 à 15N. La résolution de cette force est environ 0,04N ou 1% [SC93] [TSEC94].

D'autres expériences ont été réalisées avec un dispositif à retour d'effort. Elles montrent que la résolution de perception en termes de seuils différentiels est d'environ 7% pour la force et la rigidité élastique [TDBS95] [PTD91], 12% pour la viscosité et 20% pour la masse [BS96].

1.2.5 Applications du retour haptique

Les applications du retour haptique sont très nombreuses, de la simulation médicale à la vente par correspondance, en passant par le domaine des jeux. On donne ci-dessous quelques exemples dans les principaux domaines d'application :

Médecine et santé : Les interfaces à retour haptique sont très intéressantes pour des applications médicales qui permettent par exemple des procédures délicates de façon peu envahissante, et la chirurgie à distance à l'aide de télémanipulateurs. A l'avenir, les chirurgiens experts pourront travailler d'un poste de travail central, effectuant des opérations en divers endroits, avec des machines télécommandées opérant sur des patients localisés ailleurs. Le

chirurgien assurera alors une “téléprésence” et pourra ainsi effectuer beaucoup plus d’opérations d’un type semblable avec moins de fatigue.

Education : L’exploitation du sens du toucher peut donner par exemple la possibilité aux étudiants de sentir un phénomène aux échelles nanoscopiques, macroscopiques ou astronomiques.

Jeux et jouets : Le retour haptique se retrouve dans certaines manettes de jeux vidéo et simulateurs qui permettent à l’utilisateur de sentir différents effets suivant la situation. Par exemple, les volants à retour de force dans les simulateurs de conduite renvoient une force à l’utilisateur qui dépend de la vitesse du véhicule et de l’état de la route.

Industrie : L’intégration de l’haptique dans les logiciels de CAO permet à l’utilisateur de ressentir les forces de collision lors d’assemblage de pièces. La simulation d’opérations délicates de montage/démontage de pièces permet alors d’optimiser le geste du technicien avant son accomplissement. Le retour haptique facilite également le contrôle de machines situées sur un site distant ou dans un environnement hostile (téléopération).

Art : Les technologies haptiques peuvent intervenir à différents niveaux dans le cadre d’une application artistique : au niveau de la conception de l’œuvre d’une part, au niveau de sa présentation et mise en valeur auprès du public d’autre part. Ainsi, on peut imaginer une œuvre d’art interactive sensible au toucher ou plus simplement une œuvre dont on voudra faire ressentir la texture sans endommager l’original. Ce pourrait être le cas avec de nombreuses peintures dont les reliefs sont accentués par le jeter des couleurs et que l’on a envie non seulement de regarder mais aussi de toucher.

1.3 Les systèmes à retour haptique

Une interface haptique est un périphérique informatique qui permet à son utilisateur d’interagir avec une application logicielle ou un objet virtuel par l’intermédiaire du sens du toucher. Il se compose généralement d’une structure mécanique articulée équipée d’actuateurs et de capteurs, reliés à une électronique embarquée. L’utilisateur prend en main l’extrémité de la structure, et/ou la déplace librement, à la fois dans le monde réel et dans la scène virtuelle. Lorsque sa main virtuelle entre en contact avec un objet numérique, l’information est renvoyée à l’interface haptique qui simule, via le contrôle des actionneurs, un contact réel.

La figure 1.3 illustre des éléments clés de l’interaction entre un système de rendu haptique et un utilisateur humain. Du côté humain, quand un utilisateur touche un objet réel ou virtuel, les forces sont imposées sur la peau et le muscle. L’information sensorielle associée est transmise au

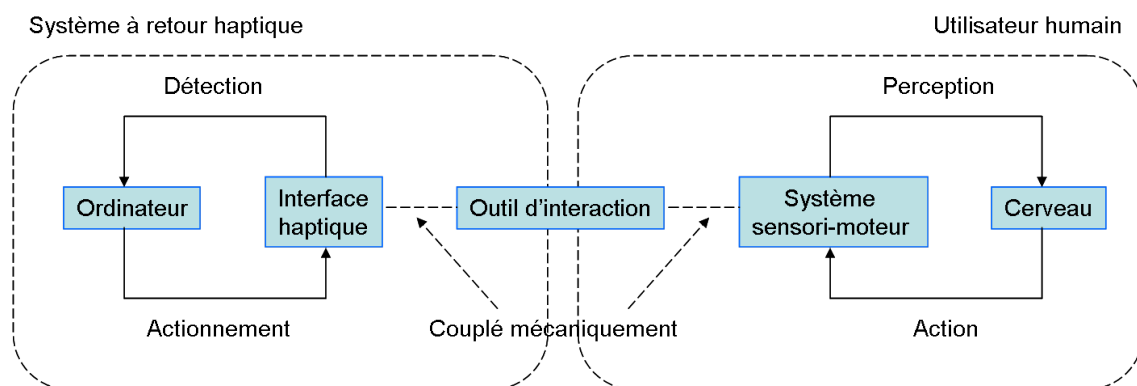


FIGURE 1.3 – Illustration des éléments clés de l’interaction entre un système de rendu haptique et un utilisateur humain (inspiré par [CT04])

cerveau et conduit à la perception. Les commandes émises par le cerveau activent les muscles et entraîne des mouvements de la main et du bras. Du côté du système haptique, lorsque l’utilisateur humain manipule l’effecteur de l’interface, les capteurs de position sur le dispositif transmettent leur information à l’ordinateur. Les modèles d’objets implantés dans l’ordinateur calculent en temps réel les commandes de couple ou de force à imposer aux actionneurs de l’interface haptique, afin que les forces de réaction appropriées soient appliquées sur l’utilisateur, ce qui conduit à la perception haptique des objets virtuels.

Comme la sensation haptique est classée en deux types, les systèmes à retour haptique peuvent être également classés en deux familles : les systèmes à retour kinesthésique et les systèmes à retour tactile. Cependant, des dispositifs combinant le retour de force et le retour tactile ont émergés dans les dernières années.

1.3.1 Le retour kinesthésique

Les dispositifs à retour kinesthésique (ou de force) proviennent principalement des besoins en matière de téléopération et de télérobotique. Ces dispositifs semblent avoir atteint une certaine maturité et profitent de l’architecture des manipulateurs de robotique (série, parallèle, sphérique, etc.). Les dispositifs kinesthésiques les plus courants peuvent être regroupés en deux grandes catégories : (i) les manipulateurs du type “bras maître” qui sont souvent utilisés dans des applications de téléopération bilatérale, et (ii) les dispositifs de bureau qui comprennent les manettes de jeu à retour de force, les stylos à retour de force, les systèmes à câbles, les pointeurs et souris à retour d’effort, etc. Nous pouvons citer comme exemples typiques commercialisés le *PHANToM* [Sen], l’*OMEGA* [FD] et le *Falcon* [Nov] (Figure 1.4).

Les actionneurs utilisés dans ces dispositifs sont essentiellement électromagnétiques, étant donné la simplicité de leur contrôle. Cependant, de nombreuses technologies d’actionneurs sont

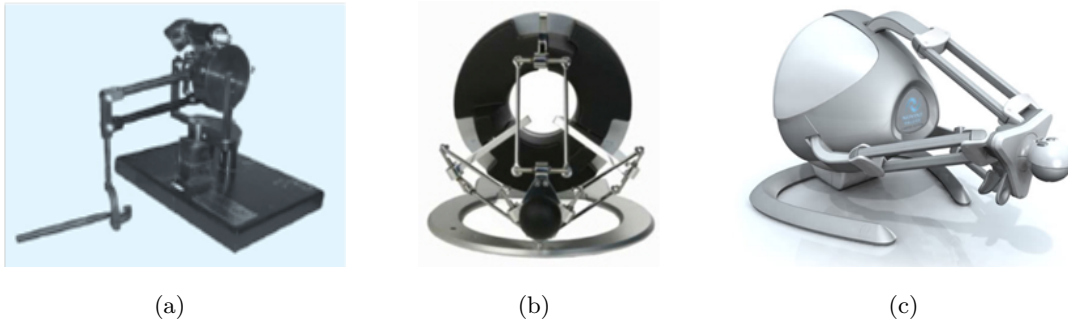


FIGURE 1.4 – Des exemples de dispositifs à retour kinesthésique. (a) le *PHANTOM* [Sen], (b) l'*OMEGA* [FD], (c) le *Falcon* [Nov]

explorées aujourd’hui pour réaliser le retour kinesthésique. On peut citer les technologies hydrauliques et pneumatiques [KOR06], les fluides électrorhéologiques et magnéto-rhéologiques [BSSR02], les polymères électroactifs et les alliages à mémoire de forme [KOR06]. Les moteurs piézo-électriques sont également employés pour les applications à retour d’effort car leur couple massique est important [IM95] [GSA04] [DGLS06].

1.3.2 Le retour tactile

De nombreux périphériques à retour tactile ont été développés, essentiellement au niveau académique, exploitant divers modes d’interaction avec l’utilisateur. Ils ont été initialement conçus pour la substitution sensorielle en téléopération, comme un outil d’aide pour comprendre le sens tactile de l’homme, et pour pallier la déficience visuelle. La plupart des dispositifs s’inspirent des premiers stimulateurs tactiles (*Optacon* [GT74]) destinés aux lecteurs en Braille et se composent d’un assemblage de picots actifs de grande densité. La bande passante et le niveau d’intégration de ces dispositifs dépendent fortement de la technologie d’actionnement utilisée. On qualifie cette famille de stimulateurs tactiles de “dispositifs à matrices de picots”. Ces picots excitent la peau du bout du doigt soit par stimulation normale [YKSK07] [KKKS06] (Figure 1.5a,b), soit par étirement latéral [Hay04] (Figure 1.5c).

Ces dernières années, les dispositifs tactiles basés sur le contrôle du frottement entre le doigt et une surface ont été développés. Ce type d’interface tactile peut créer des sensations de texture par des variations de frottement de la surface. Ainsi, dans l’étude de [KTM07], Kotani et al. ont proposé une méthode pour fournir une sensation tactile à l’homme en utilisant des ondes acoustiques de surface (SAW). Un signal appliqué à un transducteur interdigité (IDT) déposés sur un cristal piézo-électrique poli produit à la surface du cristal des déformations ultrasonores dites “ondes de Rayleigh”. Une onde stationnaire (fréquence de l’ordre de quelques

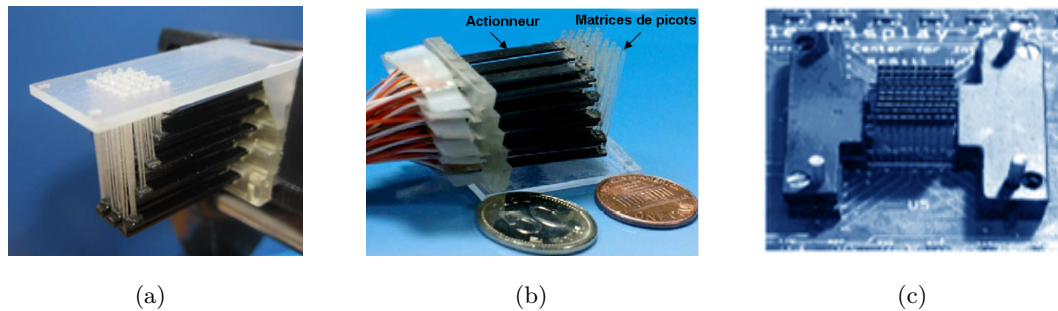


FIGURE 1.5 – Exemples de dispositifs tactiles de type “matrices de picots” (représentation de [YKSK07] [KKKS06] [Hay04])

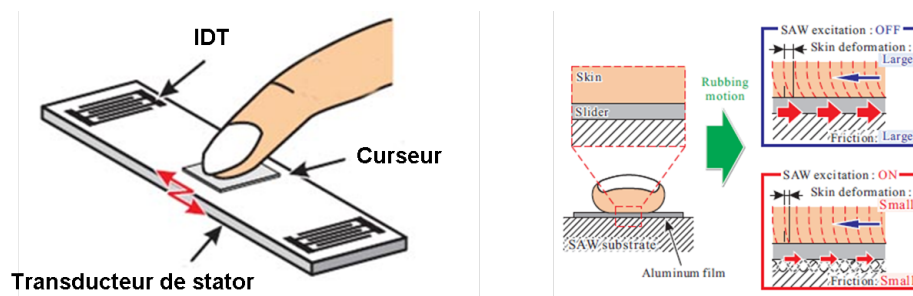


FIGURE 1.6 – Interface tactile à onde acoustique de surface (SAW) (représentation de [KTM07])

MHz ; amplitude de l'ordre de quelques nm) est donc générée sur le dispositif en utilisant la superposition de deux ondes progressives (Figure 1.6). Cette onde stationnaire génère un changement de frottement sur la surface du substrat. Lorsque la surface est explorée par le doigt via un élément intermédiaire appelé “slider”, le changement de friction peut être perçu par l'utilisateur.

Dans une autre gamme de fréquence et d'amplitude, le contrôle du frottement est obtenu par exploitation de l'effet squeeze film : il a été montré que des vibrations à fréquence ultrasonique (au-delà de $25kHz$) et amplitude micrométrique entre deux plaques planes créent un film d'air entre les deux surfaces qui peut réduire la friction. Appliqué au couple doigt-surface plane, ce principe permet de réduire le frottement ressenti par un utilisateur dont le doigt explore directement la surface de l'interface tactile. C'est un moyen de contrôle indirect des forces de cisaillement sur le doigt lors de l'exploration active. L'utilisation de la position des doigts sur l'interface permet de créer des sensations de textures spatiales. Selon ce principe, nous pouvons citer le *T-PaD* [WGCP07] actionné par une pastille piézo-électrique unique et le *Stimtac* [BGLS07] actionné par un ensemble de céramiques piézo-électriques (Figure 1.7).

Toujours dans la famille des dispositifs à frottement contrôlé, on trouve également le *TeslaTouch* [BPIH10]. Par rapport aux dispositifs précédents, il s'agit bien d'un contrôle du frot-



FIGURE 1.7 – a). Le *T-PaD* [WGCP07]; b). Le *Stimtac* [BGLS07].

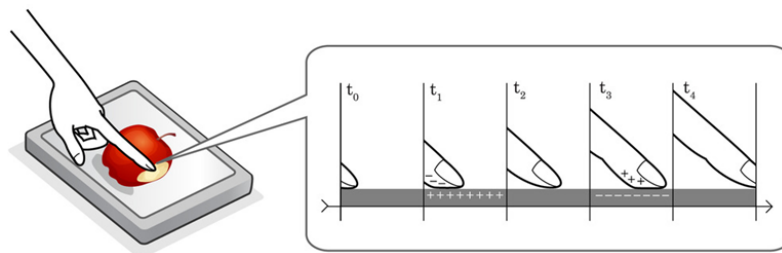


FIGURE 1.8 – Le *TeslaTouch* basé sur l'électrovibration en contrôlant l'attraction électrostatique entre une surface tactile et le doigt de l'utilisateur [BPIH10].

tement, mais dans ce cas, on l'augmente plutôt qu'on ne le réduit. Ce dispositif est basé sur le principe de l'électro-vibration, qui nous permet de créer une large gamme de sensations tactiles en contrôlant l'attraction électrostatique entre une surface tactile instrumentée et les doigts de l'utilisateur (Figure 1.8). Lorsque la force d'attraction entre le doigt et la surface existe, le coefficient de friction apparent est augmenté. On peut donc sentir ce qu'on touche sur l'écran, que ce soit une texture, une friction ou une vibration.

1.3.3 Couplage kinesthésique et tactile

Le retour kinesthésique et le retour tactile sont généralement traités séparément. Il existe d'ailleurs un grand nombre d'applications pour lesquelles l'un ou l'autre des retours prévaut, ce qui permet de faire l'économie de l'autre. Cependant, du point de vue perceptif, ce n'est pas la façon la plus naturelle de percevoir notre environnement. Par exemple, quand on saisit un objet, on ressent simultanément la texture de sa surface, sa dureté, son poids et l'objet saisi glisse ou pas. Cela signifie que les perceptions kinesthésique et tactile sont fusionnées. Pour une investigation psychophysique renforcée, ainsi que pour une présentation plus réaliste d'une impression haptique complète, la stimulation simultanée de la modalité kinesthésique et de la modalité tactile est essentielle.

L'objectif de ce paragraphe est de dresser l'état de l'art des dispositifs haptiques couplés, qui

assurent à la fois un retour d'effort et un retour cutané. Nous avons déjà brièvement introduit les dispositifs kinesthésiques et tactiles à partir de leur structure et de leur technologie. Dès lors, il paraît essentiel de présenter ici les dispositifs à partir de leur fonctionnalité au niveau de couplage kinesthésique et tactile. Nous avons ainsi choisi de les classer en quatre catégories : les dispositifs à affichage de forme, à affichage de texture, à affichage de souplesse, et à affichage de glissement.

1.3.3.1 Simulation de la forme

Les dispositifs dédiés à la simulation de forme reposent sur l'observation que la sensation de toucher une surface arbitraire peut être obtenue par le déplacement contrôlé d'une surface réelle sous le doigt. Ces dispositifs sont connus comme "location displays" ou "encounter-type displays" [HM07].

Récemment, plusieurs nouveaux schémas conceptuels ont été proposés, et en particulier deux nouvelles approches ont été présentées pour l'explication de la perception de forme. La première suppose que la reconnaissance de forme est due soit à la perception du glissement du bout du doigt sur la surface de l'objet ou au déplacement de l'aire de contact sur le bout du doigt [KPNC04]. La seconde considère que la reconnaissance de forme est liée à la perception de l'orientation de la surface de l'objet aux points de contact [SYYM04]. Ce concept a été exploité pour construire un système robotique qui permet d'orienter les surfaces mobiles sur les plans tangents à l'objet virtuel qui est simulé.

De façon plus complète, on peut reprendre l'approche développée dans [Hay04], selon laquelle la conception d'un dispositif à retour de forme peut être généralement abordée selon trois échelles :

1). Pour les gros objets, l'affichage d'une forme est effectivement obtenu par la reconstitution de la zone de contact doigt-surface et le respect de l'orientation du contact. Ainsi une plaque plane, en contact pivotant avec le bout du doigt en fonction des mouvements exploratoires réels, fournit les informations souhaitées de la déformation du doigt (Figures 1.9).



FIGURE 1.9 – a). Déformation normale du bout du doigt lors de l'exploration. b). Reconstitution de la zone de contact en fonction du déplacement [Hay04].

Un mécanisme approprié pour créer ces déformations du doigt est constitué d'une liaison sphérique de cinq-barres conçue de telle sorte que son centre de rotation se situe sous le doigt, comme le montrent les figures 1.10 a,c. La plaque plane sous un doigt pivote selon deux degrés de liberté (Figure 1.10b,d). De cette façon, une surface tridimensionnelle peut être affichée.

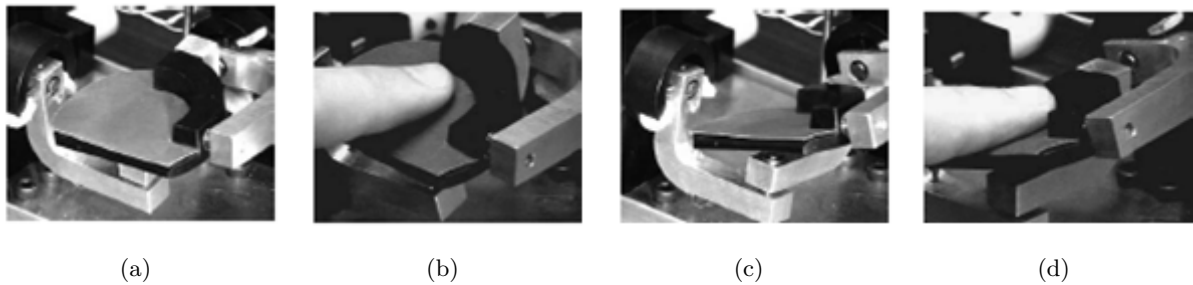


FIGURE 1.10 – (a, c) La liaison sphérique à servocommande. (b, d) Le doigt posé sur la plaque [Hay04].

2). Pour les objets de taille moyenne, l'affichage de forme est codée par la déformation latérale du doigt. Lors de l'exploration de la forme d'un objet de taille similaire à celle du doigt, l'information que le cerveau utilise pour interpréter la forme est la déformation de roulement du bout du doigt (Figure 1.11a). Dans ces conditions, un champ de forces latérales appliquées par une plaque plane provoque des déformations du doigt qui ressemblent à celles rencontrées lors de l'exploration des surfaces lisses (Figure 1.11b)

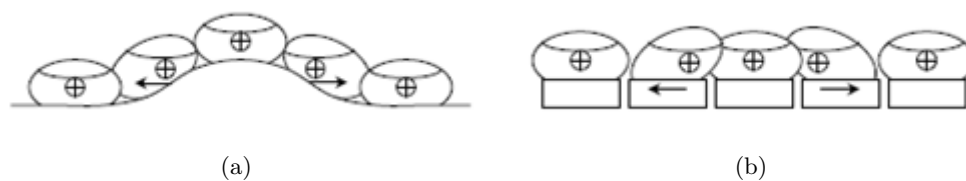


FIGURE 1.11 – a). Déformation du bout du doigt. b). Méthode pour simuler la forme [Hay04].

Le dispositif préconisé pour la création un tel champ de forces latérales est le *Pantograph* (Figure 1.12). Ce dispositif a été récemment réaménagé de manière à inclure un piédestal afin de détecter la force et des codeurs de position numériques de haute résolution.

3). Pour les petits objets, de taille réduite à l'échelle du doigt, l'affichage de forme est donné par l'étirement et la compression de la peau au niveau local (Figure 1.13). Le dispositif tactile "*Stress*" repose sur le fait que lorsqu'un doigt rentre en contact avec un objet, sa déformation

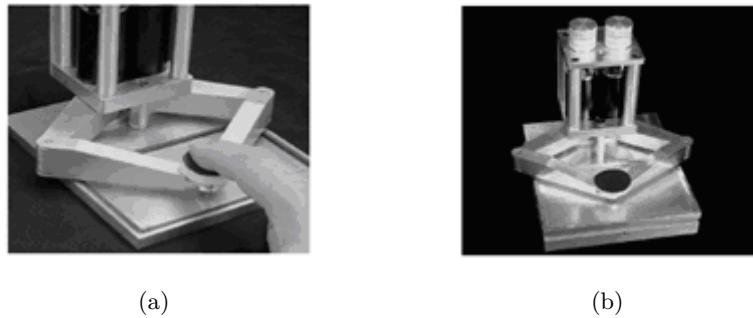


FIGURE 1.12 – a). Le *Pantograph* avec l'espace de travail plan. b). Système de détection de la force avec des encodeurs de haute résolution [Hay04].

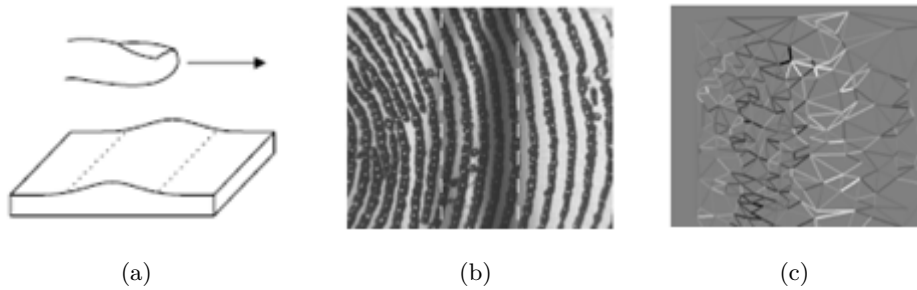


FIGURE 1.13 – a). Un doigt glisse sur une crête d'échelle millimétrique ($0,5\text{mm}$ de haut). b). Vue de la peau et des crêtes dermiques. c). Les régions de la peau en compression sont représentées par des segments plus sombres, tandis que les régions d'étirement sont représentées par des segments clairs [Hay04] [LH03].

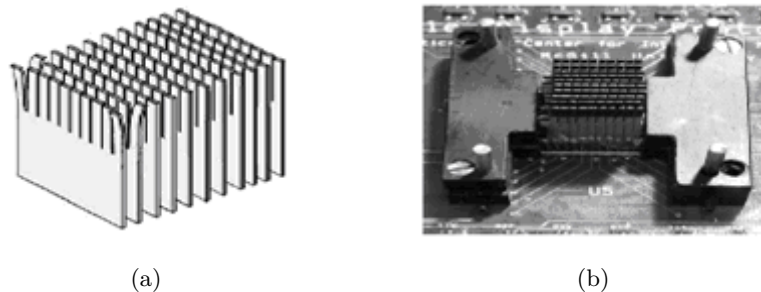


FIGURE 1.14 – a). L'ensemble à deux dimensions d'actionneurs piézoélectriques. b). Le système réalisé avec une surface active de 1cm^2 [Hay04].

est accompagnée par des changements locaux de la peau.

Le *Stress* actuel est composé d'un ensemble à deux dimensions d'actionneurs piézoélectriques flexibles qui peuvent être suffisamment intégrés pour créer la sensation des objets en continu (Figure 1.14).

Dans [CFM⁺05], les auteurs présentent un concept de dispositif haptique pour l'affichage de la géométrie au point de contact local sur le bout du doigt de l'utilisateur. Ils proposent une extension de l'interface haptique développée par [SYYM04], afin de construire une bague haptique active, portable et qui peut être fixée au doigt de l'utilisateur (Figure 1.15). Le dispositif est équipé d'un système de commande qui contrôle le mouvement d'un disque, qui peut ainsi rentrer en contact avec le bout du doigt avec des orientations différentes.

Comme indiqué précédemment, le contrôle de l'orientation du disque permet de simuler les formes larges. De plus, ce disque peut également créer une déformation latérale du bout du doigt et simuler alors une forme de taille moyenne.

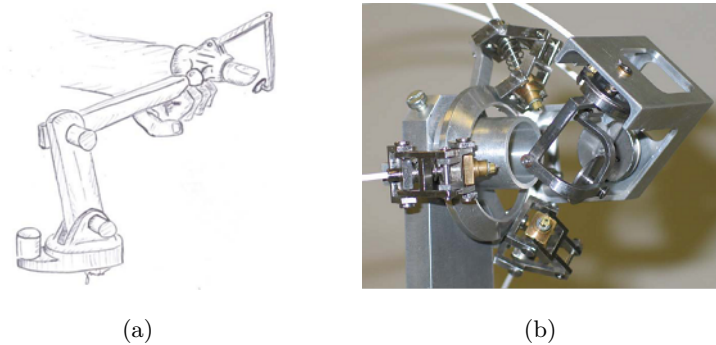


FIGURE 1.15 – a). Le schéma conceptuel du dispositif. b). La mise en œuvre finale du premier prototype [CFM⁺05].

Un autre dispositif à retours tactile et kinesthésique est proposé par Sato et al. [SKKT07a] [SKKT07b]. Le retour tactile est assuré par un dispositif électro-tactile qui se compose d'une matrice d'électrodes. Chaque électrode peut générer un courant à l'intérieur de la peau et stimuler directement les nerfs qui sont reliés à des mécanorécepteurs. Comme l'électrode peut stimuler la peau au niveau local, ce dispositif électro-tactile permet de simuler les formes de taille réduite à l'échelle du doigt.

Le montage de ce dispositif électro-tactile sur un dispositif kinesthésique permet également de distinguer la forme plus large d'un objet (Figure 1.16). Par exemple, à partir de la sensation kinesthésique produite par une forme circulaire et de la sensation tactile d'une surface concave-convexe, nous pouvons reconnaître que nous touchons un engrenage [SKKT07b] (Figure 1.17).

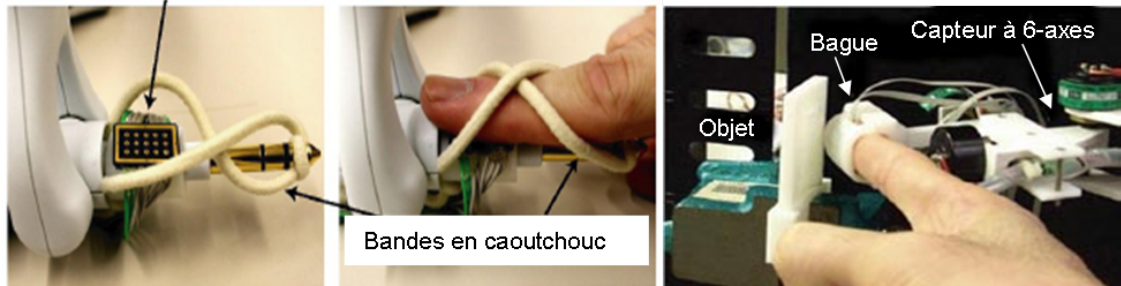


FIGURE 1.16 – Dispositif électro-tactile connecté à l'effecteur du *PHANToM* [SKKT07a] [SKKT07b].

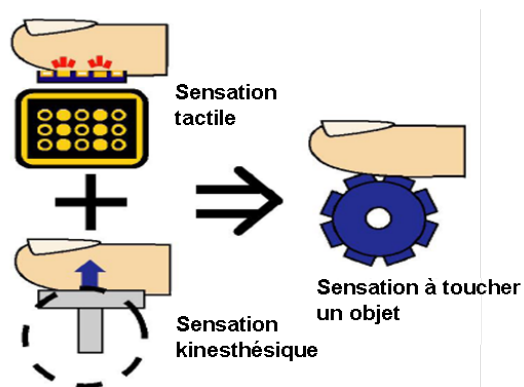


FIGURE 1.17 – Présentation de la forme d'un engrenage par l'intégration électro-tactile et kinesthésique [SKKT07a].

1.3.3.2 Simulation de la texture

Nous avons évoqué au paragraphe 1.3.2 certains dispositifs à retour tactile. Ces effecteurs se rangent principalement dans deux catégories, l'une pour laquelle le doigt est posé de façon passive sur l'interface et ressent l'effet de picots actifs sous le derme (approche discrète), l'autre pour laquelle le doigt explore de façon active une surface plus large dont le coefficient de friction est contrôlable (approche continue). L'objectif de ces dispositifs est essentiellement la simulation de textures fines ou encore de la rugosité des surfaces.

Pour la première famille de dispositifs, le doigt étant fixe sur l'effecteur tactile, le geste exploratoire du toucher n'est pas respecté. L'idée naturelle consiste donc à monter l'effecteur tactile sur une base mobile afin d'assurer la possibilité de mouvement exploratoire du doigt. De là, on peut facilement imaginer ajouter à ce dispositif mobile une fonctionnalité retour d'effort et tendre alors vers un dispositif assurant à la fois le retour d'effort et le retour tactile. Une large gamme de textures peut alors être simulée.

Nous donnons par la suite des exemples de ces dispositifs couplés par l'adjonction d'un effecteur à retour tactile discret sur une structure kinesthésique.

La structure discrète la plus souvent proposée repose sur une matrice de picots à déplacement normal au doigt. Ainsi, dans l'article [WPF⁺05], les auteurs ont présenté un dispositif haptique couplé tactile et kinesthésique en utilisant une interface constituée d'un ensemble de picots mécaniques actionnés par des servomoteurs radio contrôlés (RC) disponibles dans le commerce (Figure 1.18). Un bras de robot commercial à faible impédance, avec un large espace de travail, est utilisé pour assurer le retour kinesthésique (*Whole-Arm Manipulateur* (WAM), Barrett Technology, Cambridge, MA). La matrice de picots a été fixée de manière rigide à l'extrémité de la première liaison du bras de robot.



FIGURE 1.18 – Exemple de dispositif couplé tactile-kinesthésique utilisant une matrice de picots sur un bras de robot [WPF⁺05].

Un autre exemple est donné dans [FEB06] : l'interface tactile *VirTouch Mouse* (Figure 1.19a) contient trois modules de type Braille, respectivement pour l'index, le majeur et l'annulaire. Chaque module Braille est constitué d'une matrice de 32 picots (configuration 4×8). Chacun

des 96 picots est contrôlé de façon autonome dans l'axe normal à la peau du bout du doigt de l'opérateur. La figure 1.19b montre l'interface tactile matricielle montée sur un bras *ViSHaRD 10* (Virtual Scenario Haptic Rendering Device avec 10 degrés de liberté).

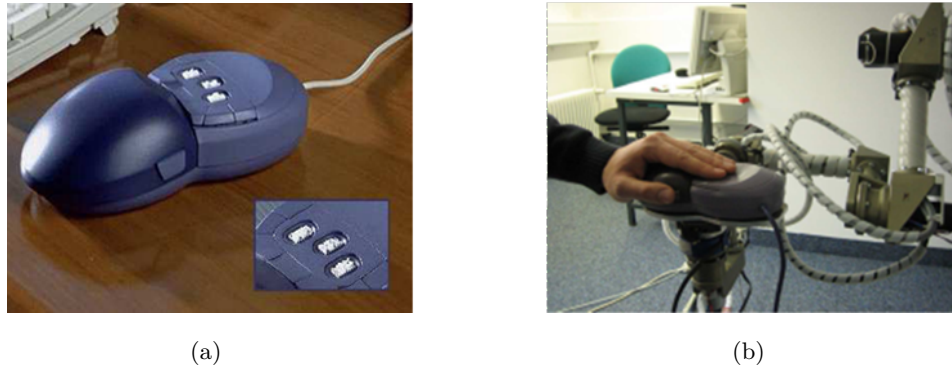


FIGURE 1.19 – L'interface tactile de type picot-tableau monté sur *ViSHaRD 10*. a). *VirTouch Mouse*. b). L'adjonction *VirTouch Mouse* sur *ViSHaRD 10* [FEB06].

Toujours dans le même esprit, Ki-Uk Kyung et Jun-Young Lee ont développé un dispositif “*Ubi-Pen*” composé d'un module d'interface tactile monté sur le système à retour de force *PHANToM Omni* [KL09] (Figure 1.20). Le module d'interface tactile consiste en un arrangement de 3×3 petits actionneurs électromagnétiques linéaires.

Kyung et al. ont également développé un autre dispositif haptique en utilisant la structure “matrice de picots” [KSKK04]. Le système se compose de deux parties : une interface à retour tactile pour réaliser la stimulation normale à la peau (Figure 1.21a) et une interface à 2 DDL à retour de force pour l'affichage kinesthésique (Figure 1.21b). La partie tactile est cette fois composée d'une matrice de huit bilames piézoélectriques qui assurent la stimulation normale de la peau.

La technologie pneumatique est aussi employée pour indenter la peau dans la direction

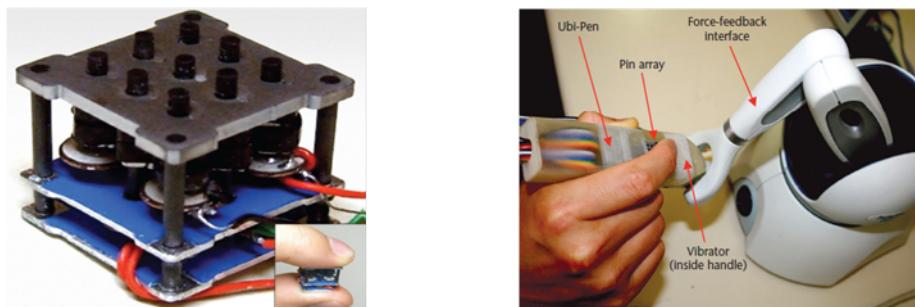


FIGURE 1.20 – Couplage de l'*Ubi-Pen* à l'interface haptique *PHANToM Omni* [KL09].

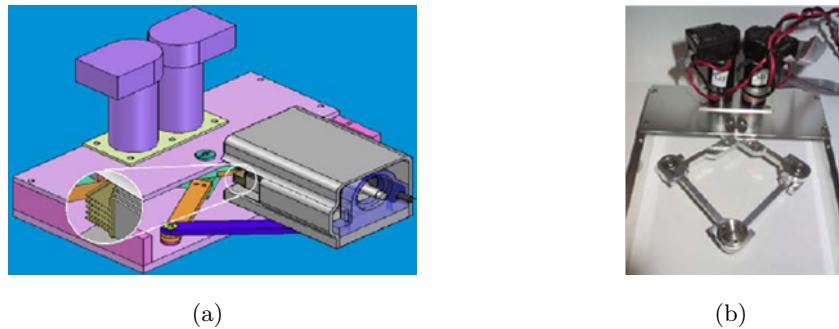


FIGURE 1.21 – Conception du dispositif intégré kinesthésique et tactile. a). Le matrice de picots pour réaliser la simulation normale à la peau. b). Le mécanisme pour le retour de force latérale à 2 DDL [KSKK04].

normale. L'interface tactile pneumatique produit un retour tactile en injectant des jets d'air sur la peau d'un utilisateur. Un simple prototype d'actionneur pneumatique comporte 25 jets d'air individuels disposés en grille de 5 par 5. Cette interface peut être fixée sur un bras à retour d'effort tel le *PHANToM*, ainsi qu'il est montré dans [KOR06] (Figure 1.22).

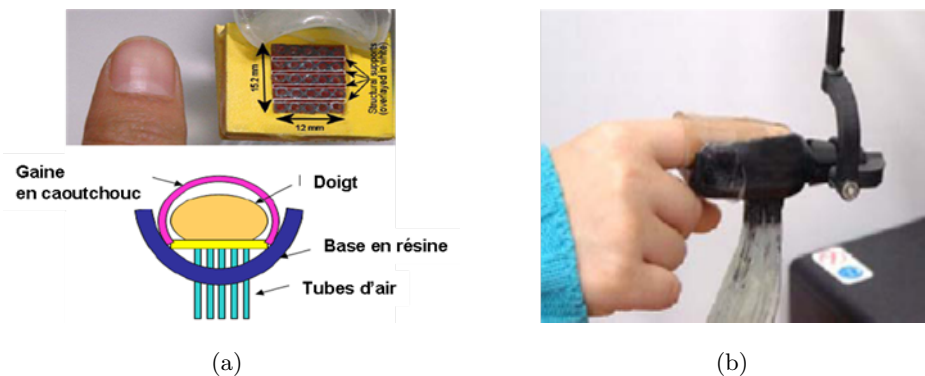


FIGURE 1.22 – a). La structure de la matrice de valves pneumatiques. b). L'adjonction l'actionneur pneumatique sur l'effecteur du *PHANToM* [KOR06].

1.3.3.3 Simulation de la souplesse

La perception de la souplesse devient de plus en plus importante dans l'exécution de tâches de réalité virtuelle. Cependant, peu de recherche traitent de l'affichage de la souplesse pour des dispositifs de télémanipulation. Le bras à retour d'effort *PHANToM* ainsi que les gants sensitifs à retour de force sont largement utilisés dans la télé-opération, mais ils sont intrinsèquement des dispositifs d'affichage de force, non adaptés à la reproduction de la souplesse au bout des doigts

de l'homme.

Des recherches ont montré que la sensation de souplesse peut être affichée en reproduisant la surface de contact, ou la largeur de contact, d'un objet virtuel sous un doigt. Bicchi et al. pensent qu'une grande partie des informations nécessaires pour discriminer la souplesse des objets par le toucher est contenue dans le taux à laquelle cette zone de contact se propage sur la surface du doigt lorsque la pression du doigt sur l'objet augmente [BSR00] [SBGB10]. Ils appellent cette information le CASR (The Contact Area Spread Rate). Le rôle d'un dispositif "CASR" sera alors justement de reproduire le taux avec lequel la zone de contact du matériau touché s'étend sur la surface du doigt. Une mise en oeuvre possible d'un tel dispositif est décrite dans la figure 1.23a. L'interface "CASR" se compose d'un ensemble de cylindres de rayons différents. La pression d'air régulée dans les cylindres est perceptible à leur extrémité, et le doigt de l'opérateur explorant ces extrémités peut y être sensible

Les auteurs ont combiné l'interface "CASR" en série avec une interface haptique commerciale, le "Delta Haptic Device" (Figure 1.23b). Ce système couplé tactile et kinesthésique peut fournir l'information du déplacement provoqué par la force d'indentation de l'utilisateur. De ce fait, il améliore la discrimination de souplesse.

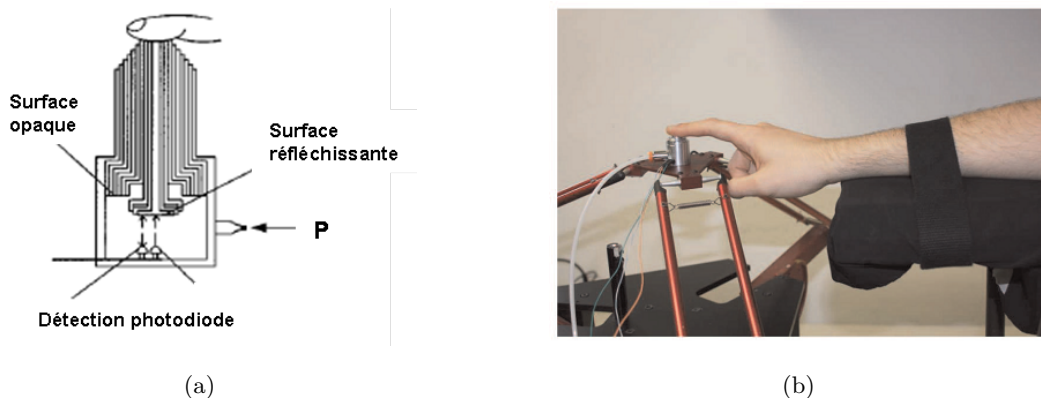


FIGURE 1.23 – a). Description de l'interface CASR [BSR00]. b). Le système couplé tactile et kinesthésique [SBGB10].

1.3.3.4 Simulation du glissement

Une sensation haptique fondamentale pour la modulation de la force de préhension est la sensation de glissement des objets sous le doigt, en particulier la sensation de glissement initial. L'importance du glissement pour la manipulation et l'exploration humaine, a été largement étudiée dans la littérature en physiologie [FW95] [FW97]. Il y a eu également des recherches actives en robotique et de nombreux groupes différents, par exemple, Tada et al. [TSO02], Melchiorri

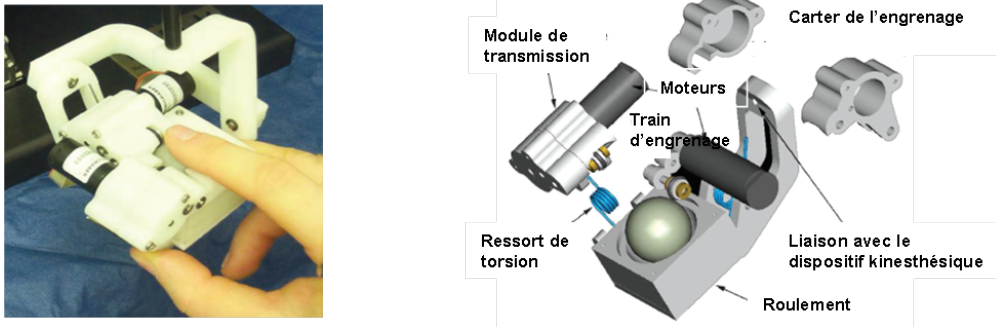


FIGURE 1.24 – Le dispositif à retour de glissement monté sur le bras de sortie d’un *PHANToM* [WMVO05].

[Mel00], Canepa et al. [CPCR98], et Tremblay et al. [TC93], ont développé des capteurs tactiles pour détecter le glissement et la condition de glissement naissant à la surface des doigts de robot. Certains de ces groupes ont également utilisé les informations de glissement recueillies par des capteurs tactiles, pour moduler la force de préhension des manipulateurs robotisés. Ainsi, la restitution du glissement permet à un robot de manipuler des objets très délicats sans les laisser tomber ni les écraser. Toutefois, dans l’autre sens, la restitution du glissement tactile ressenti par un être humain, n’est pas un problème simple, et pourtant, c’est une sensation tout à fait nécessaire à la simulation de la préhension. C’est ce qui a motivé les travaux sur le rendu du glissement.

Dans [WMVO05], un dispositif à deux degrés de liberté reproduisant les sensations de glissement dynamique et statique grâce à la rotation d’une balle placée sous le bout du doigt est présenté (Figure 1.24). Ce dispositif à retour de glissement se compose d’une boule placée au-dessous du bout du doigt. Une paire de roues motorisées orthogonales actionne la boule par frottement et crée un mouvement relatif entre la surface de la boule et le doigt de l’utilisateur qui se trouve en contact à travers une ouverture du boîtier.

Ce dispositif se connecte au bras du *PHANToM* par un cardan. Des expériences utilisant ce dispositif dans un environnement virtuel ont montré une amélioration dans la modulation de la force de l’utilisateur lors d’une tâche de manipulation délicate.

Baavour et al. ont également développé un dispositif capable de restituer le glissement d’un objet (Figure 1.25) [BFBH07]. Contrairement au dispositif précédent, celui-ci est conçu spécialement pour les tâches de préhension à efforts importants, pour la saisie d’objets relativement lourds. Ce dispositif à retour de glissement utilise deux disques en rotation permettant de recréer sur le doigt un glissement continu ainsi que les efforts de cisaillement. Il est possible de créer de nombreuses sensations, telles celle du glissement “naissant” en imposant un glissement sur l’un de deux disques et en maintenant fixe l’autre, ou la simulation d’un bouton tournant en imposant un glissement dans des directions opposées.

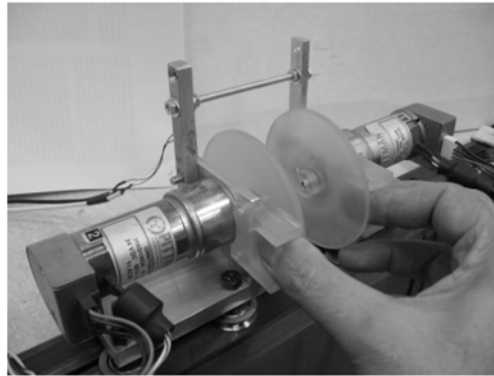


FIGURE 1.25 – Le dispositif à retour de glissement et cisaillement en utilisant deux disques [BFBH07].

1.4 Objectifs de la thèse

L'objectif de cette thèse est de proposer un dispositif haptique capable de restituer des informations tactiles et kinesthésiques. Plus précisément, partant de la constatation qu'il existe des solutions pour la reproduction des textures fines, nous souhaitons étendre la gamme de reproduction à des textures plus large, voire à des formes texturées. Dans l'état de l'art des dispositifs couplés tactile et kinesthésique, nous remarquons qu'il y a de nombreuses propositions de dispositifs qui adjoignent un effecteur à retour tactile discret sur une structure kinesthésique. Dans notre étude, nous allons coupler une interface tactile d'approche continue dont le coefficient de friction est contrôlable à une plateforme kinesthésique afin reproduire simultanément la sensation de texture et la sensation de forme.

1.5 Conclusion du chapitre

Ce chapitre nous a permis de rappeler les résultats des recherches sur les mécanismes sensorimoteurs de la perception haptique et les travaux sur les périphériques adaptées au retour haptique.

Dans la première partie, nous avons présenté l'haptique de façon générale en décrivant les propriétés du toucher à partir des aspects biomécanique et somesthésique. Au niveau biomécanique, la pulpe du doigt peut être caractérisée par une raideur non linéaire et une relaxation importante au court du temps, et la peau se comporte localement comme un corps viscoélastique. Au niveau somesthésique le toucher implique deux types de sensibilité : la sensation kinesthésique et la sensation tactile.

Puis, nous avons décrit précisément la sensation kinesthésique et la sensation tactile, surtout au niveau des mécanorécepteurs cutanés et de la sensibilité aux stimuli. On définit le système

kinesthésique comme le système qui fait intervenir les muscles, les tendons et les articulations des doigts, et le système tactile comme l'ensemble des afférents nerveux reliés aux mécanorécepteurs de la peau. Le premier concerne le déplacement, la force, le couple et la forme, etc. ; le dernier concerne la texture, la variation de pression, la température, etc.

Enfin, nous avons conclu sur les critères et besoins du domaine haptique et également sur les applications du retour haptique.

Dans une deuxième partie, nous avons présenté des dispositifs à retour haptique que nous avons classés en fonction des propriétés haptiques recherchées par les concepteurs. Après avoir décrit des éléments clés de l'interaction entre un système de rendu haptique et un utilisateur humain, nous avons présenté les systèmes à retour kinesthésique et à retour tactile en les distinguant par leur structure et les actionneurs qu'ils utilisent. Puis, nous avons souligné l'importance du couplage kinesthésique et tactile : pour une investigation psychophysique approfondie, ou pour une reconstitution plus réaliste du toucher, la stimulation simultanée de la modalité kinesthésique et de la modalité tactile est essentielle.

A la fin de cette partie, nous avons classé les dispositifs haptiques en quatre catégories, en les différenciant d'un point de vue fonctionnel : les dispositifs à affichage de forme, ceux à affichage de texture, à affichage de souplesse, et finalement ceux à affichage de glissement.

Grâce à de nombreux exemples puisés dans la littérature internationale, nous avons montré les avantages et inconvénients des dispositifs proposés. Nous en avons déduit la proposition d'une nouvelle interface couplée tactile kinesthésique qui fera l'objet de ce travail. Nous partons donc d'un effecteur tactile capable de restituer des textures fines que nous allons coupler avec un dispositif 3 DDL à retour d'effort, l'objectif étant de simuler des formes texturées, des textures larges, voire des surfaces plus complexe, selon le contrôle des DDL.

Dans les chapitres suivants, nous allons d'abord caractériser et établir trois modèles de mouvement à retour de forme. Ces modèles permettent de contrôler une plaque pivotant à la perception d'une sensation de courbure variable lors du déplacement du doigt sur la plaque. Par la suite, nous allons présenter la conception et la commande du dispositif à retour de forme. Des expériences seront effectuées pour évaluer le dispositif et à comparer les trois modèles. A la fin, nous allons concevoir une plaque tactile à frottement variable capable de reproduire des textures fines. Le dispositif à retour de forme et la plaque tactile seront finalement couplés pour simuler des textures larges.

Chapitre 2

Modèle de mouvement d'une plaque à retour de forme

Sommaire

2.1	Introduction	33
2.2	Principe et contexte	34
2.2.1	Les descripteurs de forme	34
2.2.2	La psychophysique de la forme	36
2.2.3	Comment reconstituer la sensation de forme?	38
2.2.4	Contexte : travaux de Wijntjes et al.	39
2.3	Caractérisation du modèle de mouvement à retour de forme	41
2.3.1	Modélisation de la forme virtuelle	42
2.3.2	Trois modèles de mouvement de la plaque plane	44
2.3.2.1	Modèle de mouvement sans compensation	45
2.3.2.2	Modèle de mouvement avec compensation de la vitesse	45
2.3.2.3	Modèle de mouvement avec compensation de la position	48
2.4	Conclusion	52

2.1 Introduction

La perception de forme par chaque individu dépend essentiellement de sa caractérisation géométrique. Dans notre étude, nous nous focalisons sur l'information géométrique nécessaire à

percevoir la forme. De nombreuses recherches ont montré que, pour décrire une forme, sa position, son orientation locale (la pente) et sa courbure locale sont les trois facteurs les plus importants. Les expériences effectuées par Pont et al. [PKK99] ont démontré que l'orientation locale contribue le plus à définir une forme. Wijntjes et al. [WSHK09] ont également prouvé ce point dans leurs expériences en utilisant un dispositif haptique qui peut simuler des formes avec des courbures distinguables.

Nous nous sommes donc orientés vers la réalisation d'un effecteur permettant la simulation de l'orientation locale de la forme. Notre étude se différencie de celle de [WSHK09], qui utilisent une interface haptique mobile mais sur laquelle le doigt est fixe (il n'y a pas de glissement entre le doigt et la plaque). A contrario, notre étude porte sur le toucher actif en ce qui concerne le déplacement relatif entre le doigt et la l'interface dont l'effecteur final est une plaque. Ainsi, le doigt du sujet est libre de se déplacer le long la surface de cette plaque plane lors de l'exploration. Le mouvement nature d'exploration est donc respecté. Dans ce toucher dynamique, l'orientation locale de la plaque doit être calculée en temps réel, en fonction de la position du doigt et des caractéristiques géométriques de la forme simulée.

L'objet de ce chapitre est de déterminer analytiquement le modèle cinématique d'une forme virtuelle, selon différents critères : le respect de l'orientation, de la vitesse de contact et de la position de contact [ZGLSA10].

2.2 Principe et contexte

2.2.1 Les descripteurs de forme

Quand on touche un objet, on perçoit sa texture, sa taille, sa température et sa forme. Cette dernière est fortement corrélée aux dérivées successives de la surface, telle que la courbure.

Une forme à deux dimensions, telle que le profil d'un solide extrudé, peut être spécifiée par sa position, son orientation locale (la pente), et sa courbure locale qui sont probablement tous disponibles pour le canal haptique de l'homme [PKK99]. La figure 2.1 montre une représentation schématique de trois positions du doigt touchant un stimulus convexe. Elle définit les trois descripteurs de forme. La composante position est la différence de hauteur de base à crête sur la partie touchée de l'objet. La composante d'orientation locale correspond à l'inclinaison locale pour la position où le doigt contacte l'objet. La composante de courbure locale est l'inverse du rayon au point de contact. Chacun de ces descripteurs de forme est accessible par le toucher, bien que des transformations complexes puissent être nécessaires pour transformer les données sensorielles brutes en représentations qui peuvent être utilisées par le cerveau.

La position, l'orientation locale et la courbure locale d'une surface de contact sont également appelés respectivement les descripteurs de forme d'ordre zéro, de première ordre, et de second

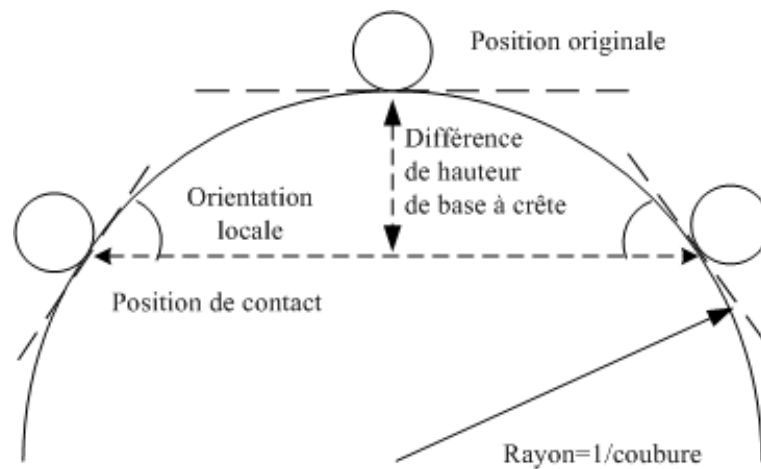


FIGURE 2.1 – La définition des descripteurs de forme : La position, l'orientation locale et la courbure locale (inspiré de [PKK99]).

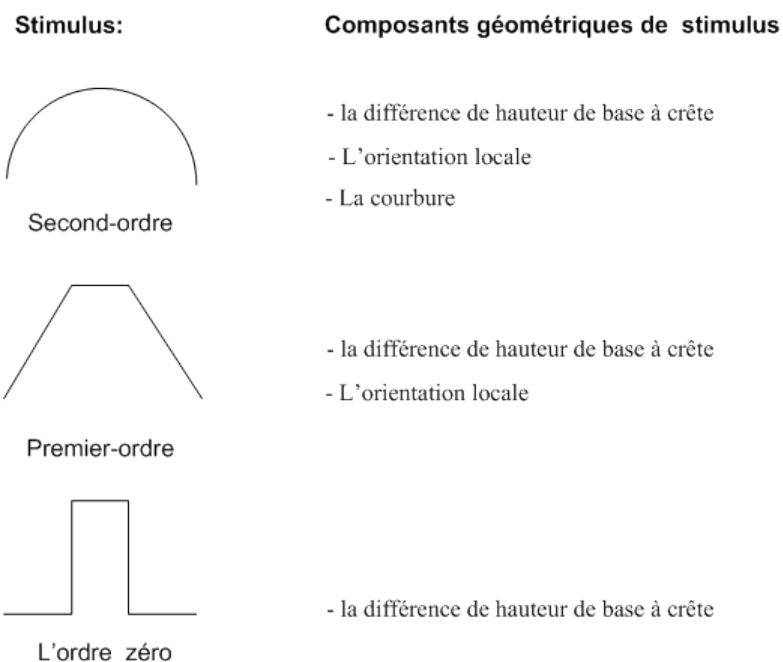


FIGURE 2.2 – la représentation schématique des trois catégories de stimuli géométriquement différentes pour simuler la forme : les formes du second ordre (stimuli courbe), les formes de premier ordre (stimuli trapézoïdale), et les formes d'ordre zéro (stimuli rectangulaires). Les propriétés géométriques de chaque stimulus sont décrites sur le côté droit (inspiré de [PKK99]).

ordre. La position, l'orientation et la courbure définissent la propriété géométrique de la forme. La figure 2.2 montre la représentation schématique des trois catégories de stimuli géométriquement différentes pour simuler la forme et qui correspondent à ces descripteurs : les objets du second ordre (stimulus courbe), les objets du premier ordre (stimulus trapézoïdal), et les objets d'ordre zéro (stimulus rectangulaire). Pour plus de clarté, les dimensions des objets sont exagérées (grandes courbure, différence de hauteur). Les propriétés géométriques de chaque stimulus sont décrites sur le côté droit.

Plusieurs études ont prouvé que, entre les trois descripteurs de forme, l'orientation de la surface locale est la principale source d'informations pour le retour de la forme [PKK99] [WSHK09] [SFSB07]. Dans l'étude de [PKK99], les auteurs ont testé la faculté de discrimination entre des surfaces courbes et des surfaces plates en utilisant les stimuli comportant des composants géométriques du second ordre, du premier ordre, et d'ordre zéro. Les résultats montrent que les seuils de discrimination pour les stimuli de second ordre et ceux du premier ordre ne sont pas systématiquement différents pour une pente locale donnée. Il peut être alors conclu que la courbure locale, qui constitue le composant de différenciation entre stimuli du premier et second ordre, ne contribue pas, de façon évidente, à la discrimination entre une surface courbe et une surface plate. De plus, l'étude montre également que le seuil de discrimination est élevé lorsqu'on utilise les stimuli d'ordre zéro ; la différence de hauteur de base-à-crête est donc également exclue en tant qu'indice de cette tâche de discrimination. Finalement, on peut conclure que la discrimination entre les surfaces courbes et les surfaces plates est basée essentiellement sur les orientations locales.

2.2.2 La psychophysique de la forme

La perception de forme par le toucher statique et le toucher dynamique (c'est-à-dire sans et avec mouvements sur la surface) : Considérons les différentes étapes d'un toucher dynamique de surface courbe : dans une première étape, l'observateur met sa main ou son doigt (s) sur une surface. Deuxièmement, l'observateur déplace la main ou le doigt sur la surface. Troisièmement, l'observateur lève sa main ou son doigt hors de la surface. La différence principale entre la discrimination de courbure par le toucher statique et par le toucher dynamique, c'est que la deuxième étape n'existe pas dans le cas du toucher statique. Or, ces mouvements à la surface pourraient fournir des informations supplémentaires pour la perception de courbure de cette surface. Par exemple, lors du toucher dynamique, il y aura des changements dans la direction du mouvement d'un doigt et dans la distribution de pression sous un doigt, si ce doigt passe sur une surface courbe. Ainsi, d'autres aspects transitoires supplémentaires de la stimulation cutanée et kinesthésique existent si la main ou le doigt sont déplacés de façon dynamique sur une surface courbe, plutôt que d'être positionnés de manière

statique sur cette surface. Il est à noter, toutefois, que des aspects transitoires de la stimulation cutanée et kinesthésique existent également dans le cas du toucher statique, pendant les phases où l'observateur pose sa main sur et quitte la surface.

La perception de forme par le toucher passif et le toucher actif (c'est-à-dire être touché et toucher, sans et avec la maîtrise de soi) : Plusieurs auteurs, dont Gibson [Gib62], Loomis et Lederman [LL86], Lederman et Klatzky [LK87], ont rapporté sur les différences entre le toucher passif et actif. Ils soulignent l'importance de l'auto-contrôle des mouvements des doigts exploratoires. Selon Gibson, ces mouvements jouent un rôle dans l'appréhension des relations invariantes qui précisent la forme d'un objet. Lederman et Klatzky suggèrent que les mouvements varient selon le type d'information souhaité. Loomis et Lederman concluent que ces mouvements mènent à une meilleure performance que d'autres manières de toucher. Sur la base de cette littérature, nous nous attendons à ce que la discrimination de courbure par le toucher actif soit supérieure à la discrimination de courbure par le toucher passif.

Les études psychophysiques de la perception de courbure-Résultats : Certaines études psychophysiques de la perception de courbure ont été faites. Gordon et Morison [GM82] ont examiné la discrimination des stimuli courbes avec deux types de courbure : la courbure sphérique et la courbure cylindrique, ces surfaces ayant été touchées de façon dynamique avec l'index. Ils ont trouvé que le type de courbure n'est pas une variable importante lorsque les surfaces sont étroites (avec une largeur de 1cm et une longueur de $2 - 4\text{cm}$). Ils ont également constaté que les seuils de discrimination sont similaires si le rapport de la hauteur de base-à-crête par la moitié de la longueur de la surface est constant. Ainsi, dans leurs expériences, ce paramètre, qu'ils ont appelé le *gradient*, représente le stimulus pertinent pour la détection de courbure. Ils ont trouvé un gradient constant de $0,009$ (75% de réponses correctes). Cela équivaut à une différence de pente locale d'environ 2° sur la surface.

Dans les expériences sur la discrimination statique de courbure, Pont et al. ont constaté que le stimulus efficace pour la détection de la courbure est la différence totale de pente sur la surface [PKK99]. Ils ont trouvé que les valeurs des seuils de discrimination (84% de réponses correctes), dans unité de la de pente en degrés, varient de 1.6° à 10° , selon le sujet et les doigts utilisés.

Enfin, Kappers et Koenderink [KK96] ont étudié la discrimination active des surfaces de courbure cylindrique. Ils ont montré que la performance a été meilleure que dans les études antérieures, en raison des effets combinés d'une plus grande surface d'exploration (de la taille d'une main) et de la discrimination active.

2.2.3 Comment reconstituer la sensation de forme ?

La perception de forme se manifeste à partir d'un stimulus spécifique délivré sous certaines conditions. Dans cette partie, on décrira quelques perceptions de forme ainsi que les moyens utilisés pour reproduire ces effets.

a. Perception de forme à partir d'un champ de forces

[RDLTH01] montre que nous pouvons obtenir l'illusion de bosse ou de trou sur un plan par ajout de forces de propulsion/réaction. Pour la représentation de l'objet réel au niveau de sa géométrie, on peut le restituer par l'intermédiaire d'un effecteur produisant des forces de résistance programmables (les forces sont illustrées sur la figure 2.3a).

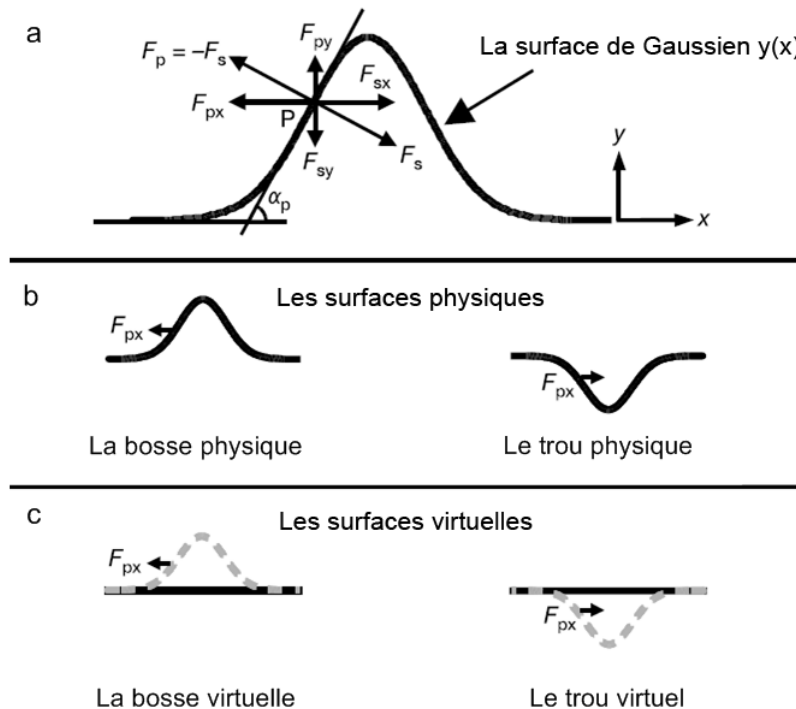


FIGURE 2.3 – Illusion de bosse ou de trou sur un plan par ajout de forces de propulsion/réaction (d'après [RDLTH01]).

Dans l'expérience, les sujets explorent des surfaces au toucher en utilisant un dispositif robotique permettant de séparer les indices de force (son sens et sa valeur) de la géométrie de surface. La force restituée par l'interface correspond à celle rendue par la surface physique, en particulier, la même composante de force horizontale est fournie. Par exemple, lorsque les sujets ont exploré une bosse ou un creux physiques, ils ont été soumis à une force horizontale F_{px} (Figure 2.3b). Quand les sujets ont exploré une surface plane avec une bosse ou un trou

virtuel (Figure 2.3c, gris, courbe en pointillés), ils ont subi la même force horizontale F_{px} , mais le doigt du sujet s'est déplacé en ligne droite (Figure 2.3c, la ligne noire). Cependant au final, ils ont perçu la bosse ou le trou et non la ligne droite. On peut donc conclure que les forces de résistance comptent beaucoup dans la perception de forme.

b. Perception de forme par le glissement

Le glissement peut intervenir lors de l'exploration d'un objet alors que l'orientation du doigt est constante. Ce glissement influence la vitesse locale d'une région de contact de la pulpe du doigt. Pour un objet convexe, avec la même vitesse de balayage, plus la courbure de l'objet est faible, plus la vitesse du contact sur la peau du doigt est faible également. Pour un objet concave, cette vitesse tend vers l'infini lorsque la courbure de l'objet se rapproche de celle du doigt. Si l'objet est plat, cette vitesse est nulle [Hay07]. Compte tenu de cette analyse, on peut donc penser simuler une convexité ou une concavité par un glissement. La génération d'un glissement a fait l'objet de nombreux travaux ; traditionnellement, ceci est effectué en contrôlant le mouvement de rotation d'un tambour afin de provoquer un glissement sous la pulpe du doigt en contact [SCVF04].

c. Perception de forme à partir d'une déformation cutanée distribuée

L'information de forme, surtout la courbure, pourrait être perçue par le déplacement de l'aire de contact sous la pulpe du doigt. En effet, quand on explore un objet solide avec le bout du doigt, on définit généralement une surface de contact. Et lorsque la trajectoire de cette surface de contact est artificiellement contrôlée, de sorte à ressembler à la trajectoire qui est normalement définie pendant le toucher réel, la sensation de forme est créée. C'est ce que démontre [DH05].

La déformation du bout du doigt peut être obtenue par le contrôle de position d'une plaque plate sur le bout du doigt lors de l'exploration d'une surface virtuelle.

2.2.4 Contexte : travaux de Wijntjes et al.

En ce qui nous concerne, nous allons particulièrement nous appuyer sur les travaux de Wijntjes et al. [WSHK09], qui ont cherché à trouver l'information dominante à la discrimination de la courbure parmi les trois descripteurs d'une forme : la position, l'orientation locale et la courbure locale. Rappelons que ces trois descripteurs sont respectivement les descripteurs de forme de l'ordre zéro, du premier ordre, et du second ordre. Pour tester le rôle de ces informations de forme dans la perception haptique, les auteurs ont mesuré les seuils de discrimination (the Just Noticeable Difference, JND) pour les trois combinaisons de descripteurs de forme ainsi que pour la forme réelle. La figure 2.4 présente les quatre conditions de l'expérience et illustre les

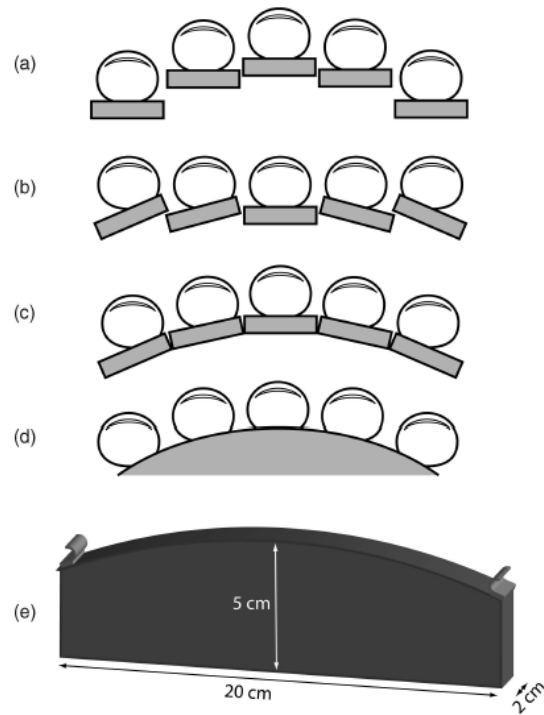


FIGURE 2.4 – Les quatre conditions. L'observateur ressent la courbure par, (a) l'information géométrique d'ordre zéro uniquement, (b) l'information géométrique de premier ordre, (c) les deux informations combinées. La quatrième condition (d) est celle d'un solide réel. Sa géométrie est représentée en (e) [WSHK09].

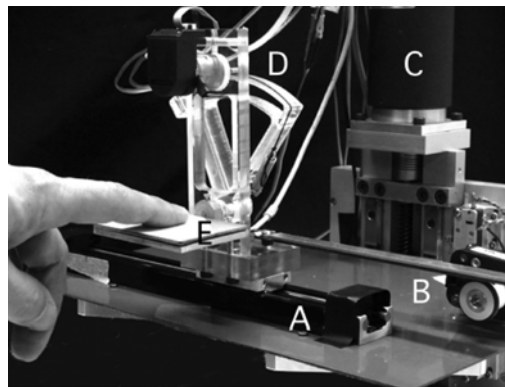


FIGURE 2.5 – Le dispositif pour produire les stimuli de la forme. Lors de l'exploration, le doigt déplace la surface de contact **E** guidé latéralement par un roulement linéaire à faible frottement. Le codeur **B** mesure le déplacement horizontal utilisé pour calculer une forme représentée par la hauteur et/ou la pente. Le servo-mécanisme **C** contrôle l'élévation et le servo-mécanisme **D** contrôle la pente [WSHK09].

mouvements d'un doigt selon les conditions du test. Il est à noter que dans les trois premiers cas, le doigt reste statique sur la surface qui change de hauteur ou d'orientation ou les deux, alors que dans le cas réel, le mouvement est continu. La figure 2.5 montre le dispositif utilisé qui peut orienter et élever une surface de contact mobile de manière indépendante. En plaçant le doigt sur la surface, un observateur peut la déplacer latéralement. L'orientation et l'élévation dépendent de la position de contact sur le profil à représenter.

Dans l'expérience, les auteurs ont utilisé une surface de référence totalement plate et ont donc mesuré le "Just Noticeable Curvedness". Les résultats de ce test de JND démontrent que les performances de discrimination dépendent largement de la disponibilité de l'information d'orientation. Une forme courbe qui est définie uniquement par un profil de hauteur (Figure 2.4a) est difficile à identifier. En outre, il n'y a pas de différence apparente entre les stimuli réels et virtuels. Une fois l'information d'orientation disponible dans un vrai stimulus ou un stimulus virtuel, la performance de discrimination de la courbure devient semblable.

Dans le but de concevoir une interface haptique capable de simuler des formes de différence courbures, une stimulation laissant libre cours au mouvement d'exploration du doigt s'avère certainement plus naturelle qu'une stimulation imposant au doigt d'être toujours au même point relativement à une plaque (il n'y a pas de glissement entre le doigt et la plaque, voir la figure 2.5). Dans notre étude, nous allons concevoir un dispositif par lequel les sujets discriminent la courbure d'une forme virtuelle à travers un toucher dynamique et actif, par un mouvement d'avant en arrière du doigt le long d'une plaque plane. Le doigt du sujet est alors libre de se déplacer sur cette plaque plane lors de l'exploration, comme lors d'un toucher exploratoire naturel.

2.3 Caractérisation du modèle de mouvement à retour de forme

Comme l'orientation locale de la surface est la source dominante d'informations pour le retour de forme, nous nous attacherons à respecter ce critère pendant l'exploration. Pour y parvenir, nous allons concevoir une interface dont l'effecteur final sera une plaque plane qui peut s'orienter, s'élever et se déplacer tout en restant toujours tangente à une forme virtuelle au point de contact lors de l'exploration manuelle. L'utilisateur percevra alors la sensation de forme en déplaçant son doigt d'avant en arrière le long de cette plaque (Figure 2.6a). Dans cette partie, nous modélisons dans un premier temps la forme à représenter. Puis, nous proposons trois modèles de mouvement de la plaque plane afin d'assurer le retour de forme.

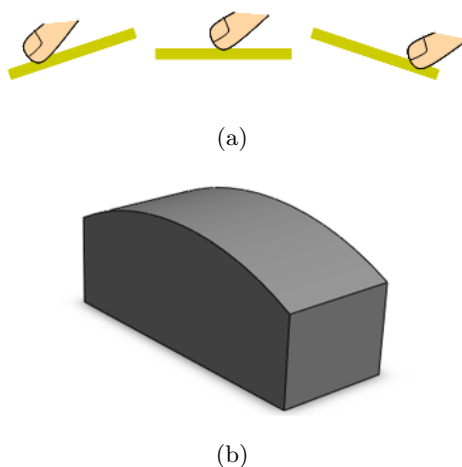


FIGURE 2.6 – a). Toucher actif en déplaçant un doigt en avant et en arrière le long d'une plaque plane. La perception de courbure est effectuée par la rotation d'une plaque en se maintenant toujours tangente à une forme virtuelle au point de contact. b). La forme à représenter.

2.3.1 Modélisation de la forme virtuelle

La figure 2.7 montre le modèle de la forme haptique, de type section de sphère, que nous allons chercher à restituer. Ceci est un exemple typique de forme, dont les dimensions, en particulier la longueur, sont en accord avec les caractéristiques de la plaque à retour tactile (voir Chapitre 4) que nous allons utiliser pour la perception de texture. M est le point de contact ; θ est l'angle entre le doigt et la plaque plane au point de contact ; U est la longueur d'une portion d'arc entre le centre O et M ; H est la hauteur de l'arc, et L la longueur horizontale de l'arc

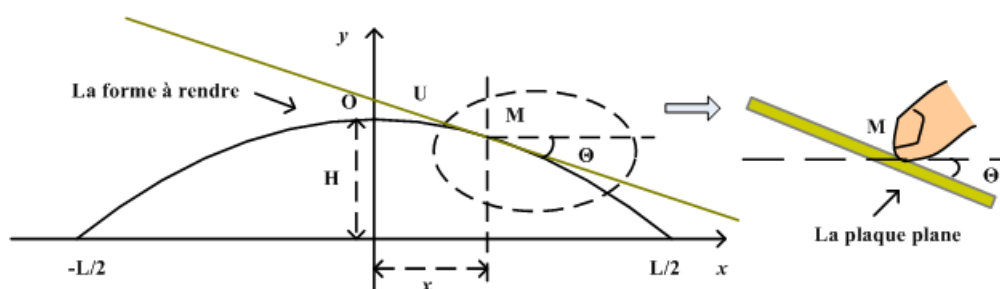


FIGURE 2.7 – modèle de forme haptique.

Comme l'angle θ définit l'orientation de la surface locale (la pente) et produit la déformation du bout du doigt lors du contact, il est donc le paramètre le plus important pour la restitution de la forme. La relation entre θ et la position du doigt sur la surface U est déduite par les étapes suivantes :

a. Le profil géométrique de la forme

Selon la caractéristique de la forme, nous déduisons le profil géométrique (la relation entre y et x dans le repère illustré le figure 2.7) :

$$y(x) = a \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right) \left(x + \frac{L}{2}\right) \quad (2.1)$$

Lorsque $x = 0$, on a $y(0) = H$. Alors le paramètre a peut être défini :

$$a = -\frac{4H}{L^2} \quad (2.2)$$

En remplaçant a de l'Eq. 2.1 par sa valeur (Eq. 2.2), nous obtenons :

$$y(x) = -\frac{4H}{L^2} \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right) \cdot \left(x + \frac{L}{2}\right) \quad (2.3)$$

b. La relation entre l'angle θ et x

La dérivation de l'Eq. 2.3 sur x donne la pente. La relation entre θ et x est donc donnée par :

$$\tan \theta = \frac{dy(x)}{dx} = -\frac{8H}{L^2} \cdot x \quad (2.4)$$

c. La relation entre U et x

U est la longueur de l'arc correspondant à x . Dans le cadre du théorème de l'arc, nous obtenons :

$$x = R \cdot \sin\left(\frac{U}{R}\right) \quad (2.5)$$

où

$$R = \frac{L^2}{8H} + \frac{H}{2} \quad (2.6)$$

d. La relation entre θ et U

En définitive, remplaçons x par son expression (Eq. 2.5) dans l'Eq. 2.4, nous obtenons :

$$\tan \theta = -\frac{8H}{L^2} \cdot R \cdot \sin\left(\frac{U}{R}\right) \quad (2.7)$$

Finalement, la relation entre θ et U s'écrit :

$$\theta = \arctan\left[-\frac{8H}{L^2} \cdot R \cdot \sin\left(\frac{U}{R}\right)\right] \quad (2.8)$$

Pour chaque point de contact M (la distance entre le centre et le bout du doigt est U), il existe un angle correspondant θ donné par l'Eq. 2.8 et qui permet de garder la plaque toujours tangente à la forme virtuelle en ce point. Comme le doigt se déplace sur la plaque et la position du bout du doigt est mesurée en temps réel, l'angle de la plaque varie en fonction de U . La figure 2.8 montre les différentes positions angulaires de la plaque pour cinq points de contact différents (cinq valeurs de U) selon l'Eq. 2.8.

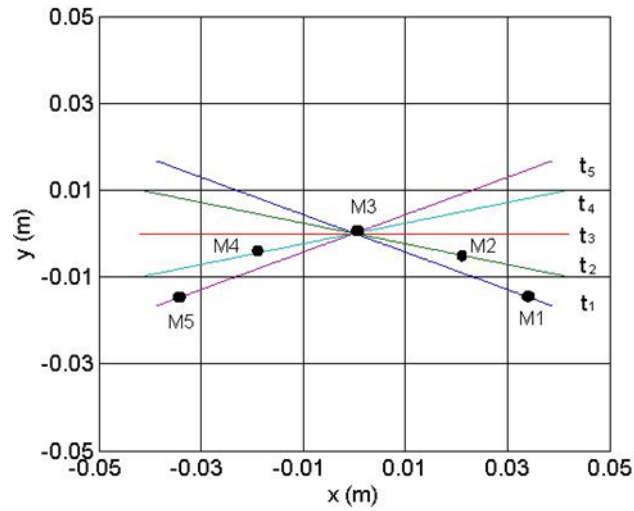


FIGURE 2.8 – L'évolution de la position angulaire de la plaque plane. Les points $M_1 - M_5$ sont des positions successives du doigt sur la plaque.

2.3.2 Trois modèles de mouvement de la plaque plane

Trois modèles de mouvement de la plaque sont proposés et analysés dans cette partie. Pour satisfaire à l'information dominante de la forme (l'orientation de la surface locale), le modèle de mouvement de la plaque avec un degré de liberté de rotation est suffisant (illustré dans la figure 2.8). Mais dans des conditions réelles de toucher du doigt sur cette plaque en rotation, le support touché sera animé d'une vitesse de rotation alors que le support réel (la forme réelle) est un objet statique sans vitesse. Nous devons donc prendre en compte la vitesse de la plaque en rotation. Par ailleurs, la position absolue du doigt n'est pas respecté avec le seul DDL en rotation. Par conséquent, outre le modèle de mouvement avec un DDL de rotation, nous proposons deux autres modèles de mouvement : le modèle de mouvement avec compensation de la vitesse de rotation (trois DDLs) et le modèle de mouvement avec compensation de la position (trois DDLs).

2.3.2.1 Modèle de mouvement sans compensation

Ce modèle de mouvement s'appuie sur un seul degré de liberté en rotation, illustré dans la figure 2.8. Il maintient la plaque toujours tangente à la forme virtuelle au point de contact lors de l'exploration afin de respecter la principale source d'information (l'orientation de la surface locale) dans la perception de courbure. Ce modèle de mouvement prend également compte de l'information hauteur du profile. Par le toucher actif, la trajectoire du doigt est une ligne courbe (de M_1 à M_5 dans la figure 2.8).

2.3.2.2 Modèle de mouvement avec compensation de la vitesse

Comme la plaque pivote autour de son point central, le point de contact sur la plaque a sa propre vitesse relativement à un repère fixe. La figure 2.9 montre le mouvement de la plaque. A l'instant t_1 , le doigt se trouve sur le point de contact M_1 . Suite à la rotation de la plaque, à l'instant t_2 , le point M_1 se déplace à la position M_1' (à cet instant, le point de contact est M_2). Alors, de la position M_1 à la position M_1' , ce point possède une vitesse V_x sur la composante x et V_y sur la composante y .

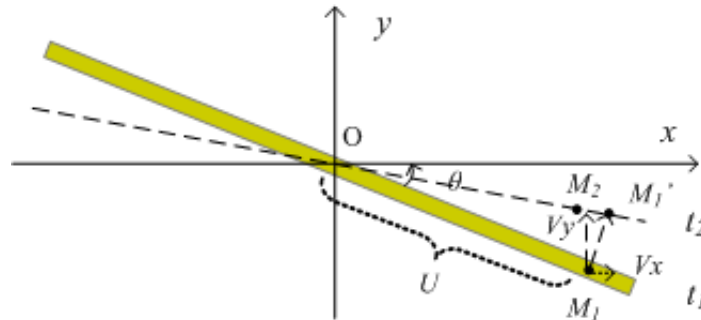


FIGURE 2.9 – Illustration de la vitesse du point de contact au cours de l'exploration.

Cette vitesse peut influencer le ressenti du manipulateur au cours de l'exploration, parce que dans l'environnement réel, la surface de l'objet ne bouge pas. Quand on touche un objet, normalement, on passe le doigt sur la surface de l'objet et l'objet est statique. Dans ces conditions, la vitesse relative entre le doigt et la surface au point de contact est la vitesse du doigt. Mais dans notre système, la plaque est dynamique, et a sa propre vitesse (comme le montre la figure 2.9). Dans ce cas, la vitesse relative est liée à la fois la vitesse du doigt et à la vitesse de la plaque. La figure 2.10 donne des exemples concernant la vitesse relative entre le doigt et la surface à explorer. Dans ces exemples, la vitesse de la surface influence beaucoup la vitesse relative. Les travaux suivants consistent à calculer la vitesse du point de contact sur la plaque et à la compenser.

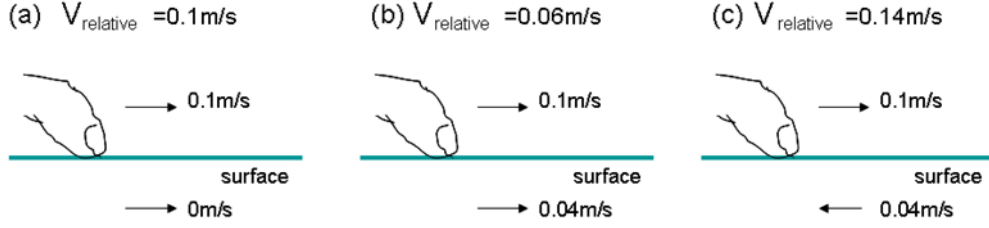


FIGURE 2.10 – Exemples de vitesses relatives entre le doigt et la surface à explorer.

a. Calcul de la vitesse du point de contact

Pour mener à bien ce calcul, nous supposons que la longueur totale de la surface à explorer et la longueur totale de la plaque sont égales ; cette hypothèse est d'autant plus justifiée que H est petit. Donc, nous pouvons utiliser le même symbole U pour présenter à la fois la longueur d'un morceau d'arc du profil de forme entre le point sommet et le point de contact et la distance sur la plaque entre le point central et le point de contact. Si H est plus grand, il faut convertir la longueur de l'arc en longueur de la plaque.

Dans le repère, la coordonnée d'un point de contact M sur la plaque peut être écrite :

$$\overrightarrow{OM} = \begin{bmatrix} U \cdot \cos \theta \\ U \cdot \sin \theta \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

La vitesse du point de contact est la dérivée de \overrightarrow{OM} en fonction du temps. Notons que la distance U est fixée pour un certain point M et seulement l'angle θ varie avec le temps. Le processus de calcul détaillé se réfère à l'Annexe **A**. Nous obtenons la vitesse la suivante :

$$V_M \in plaque = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = \begin{bmatrix} \frac{-(\frac{8H}{L^2})^2 \cdot \cos(\frac{U}{R}) \cdot \sin(\frac{U}{R}) \cdot R \cdot \dot{U} \cdot U}{[1 + (\frac{8H}{L^2} \cdot R \cdot \sin(\frac{U}{R}))^2]^{\frac{3}{2}}} \\ \frac{-\frac{8H}{L^2} \cdot \cos(\frac{U}{R}) \cdot \dot{U} \cdot U}{[1 + (\frac{8H}{L^2} \cdot R \cdot \sin(\frac{U}{R}))^2]^{\frac{3}{2}}} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Où \dot{U} est la vitesse du doigt. Habituellement, au cours de tâches d'exploration, cette vitesse est faible et a une valeur moyenne proche de 0,1 m/s [Mar06].

Afin d'avoir une impression plus intuitive, nous avons tracé l'évolution de cette vitesse sur les composantes x et y (Figure 2.11). On peut constater que la vitesse du point de contact est environ 10 fois plus faible que la vitesse du doigt sur x et 2 fois plus faible sur y , tandis qu'elle devrait être nulle si le doigt touchait une surface ayant réellement le profil de la figure 2.6b. Cette vitesse relative pouvant gêner la perception, nous allons donc chercher à l'éliminer.

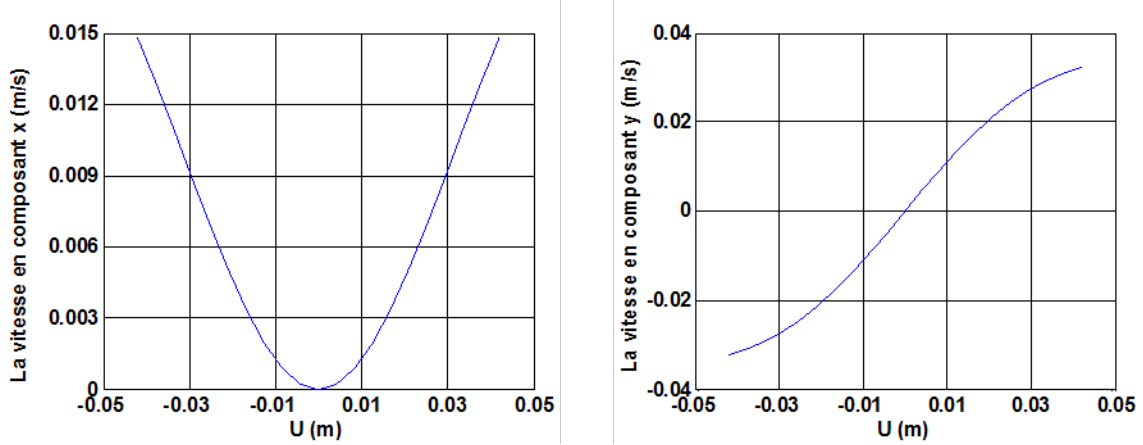


FIGURE 2.11 – Evolutions de la vitesse du point de contact sur les composantes x et y en fonction de la position du doigt.

b. Compensation de la vitesse

Afin de nous replacer dans des conditions plus proches de celles du toucher réel, nous proposons de compenser cette vitesse. L'idée est d'ajouter une vitesse opposée pour contrebalancer la vitesse induite par la rotation de la plaque en déplaçant et en élevant cette plaque dans la direction x et la direction y . Cette vitesse supplémentaire nommée x_0 selon l'axe x et y_0 selon l'axe y , devra être telle que ses deux composantes rendent la vitesse de l'Eq. 2.10 égale à zéro. On obtient :

$$\dot{x}_0 + \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}\Big|_x = 0, \quad \dot{y}_0 + \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}\Big|_y = 0 \quad (2.11)$$

soit

$$\dot{x}_0 = -\frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}\Big|_x, \quad \dot{y}_0 = -\frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}\Big|_y \quad (2.12)$$

En intégrant ensuite l'Eq. 2.12 et en utilisant l'Eq. 2.9 et l'Eq. 2.10, nous obtenons les déplacements horizontal et vertical :

$$x_0 = \int \dot{x}_0 dt = -U \cdot \cos \theta + U, \quad y_0 = \int \dot{y}_0 dt = -U \cdot \sin \theta \quad (2.13)$$

Par rapport au modèle de mouvement sans compensation (juste la rotation), ce modèle ajoute des déplacements horizontaux et verticaux de la plaque. La figure 2.12 montre la nouvelle évolution de la position de la plaque dans ce modèle, à comparer avec celle de la figure 2.8. Bien que la trajectoire du doigt soit une ligne droite horizontale, l'angle de la plaque respecte toujours l'orientation de la surface locale à chaque point de contact. De plus, conformément au calcul, les

vitesses de chaque point de contact sur les composantes x et y sont nulles. Ce modèle nécessite trois degrés de liberté : un DDL en rotation, un DDL en déplacement selon la composante x et un DDL en déplacement selon la composante y .

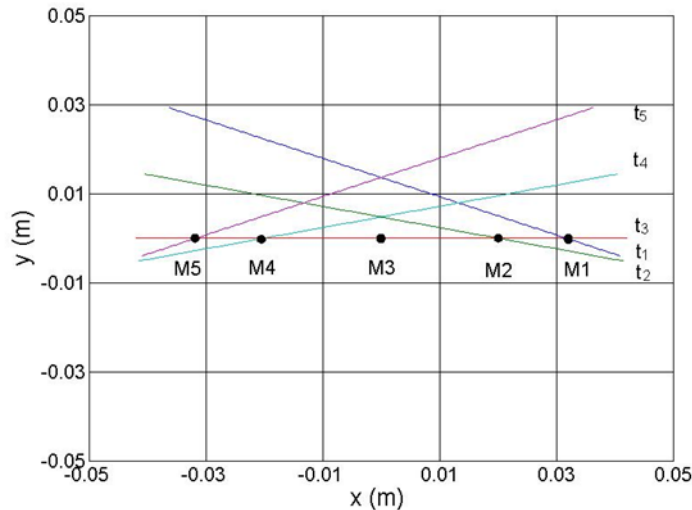


FIGURE 2.12 – Evolution de la position angulaire de la plaque plane dans le modèle de mouvement avec compensation de la vitesse.

2.3.2.3 Modèle de mouvement avec compensation de la position

Bien que le modèle de mouvement sans compensation tienne aussi compte de l'information hauteur de la forme avec lequel le doigt de l'utilisateur se déplace en suivant une ligne courbe, il existe encore un écart entre la trajectoire de déplacement du doigt sur la plaque et le profil de la forme à représenter. Autrement dit, la trajectoire du point de contact n'est pas exactement celle du profil de la forme. Cet écart est illustré la figure 2.13 : M est le point de contact sur la plaque et M_0 le point correspondant sur la forme réelle. Notons les différences entre leurs coordonnées : x_0 dans la direction x et y_0 dans la direction y .

Afin d'éliminer cette différence de coordonnées susceptible d'influencer la perception de la forme, nous proposons de conjuguer la rotation de la plaque avec des déplacements dans les directions horizontale et verticale, comme l'indique la figure 2.14. De cette manière, la nouvelle position du point de contact sur la plaque se trouve similaire à celle du point correspondant sur la forme réelle dans le même système de coordonnées.

a. Calcul des déplacements de la plaque

Nous calculons donc le déplacement de la plaque d_0 (dans les directions horizontale et verticale).

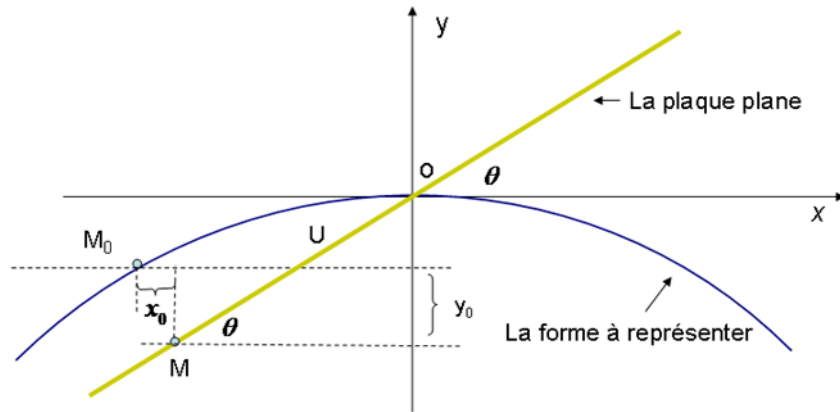


FIGURE 2.13 – Illustration de la différence entre le point de contact sur la plaque et le point à correspondant sur la forme réelle.

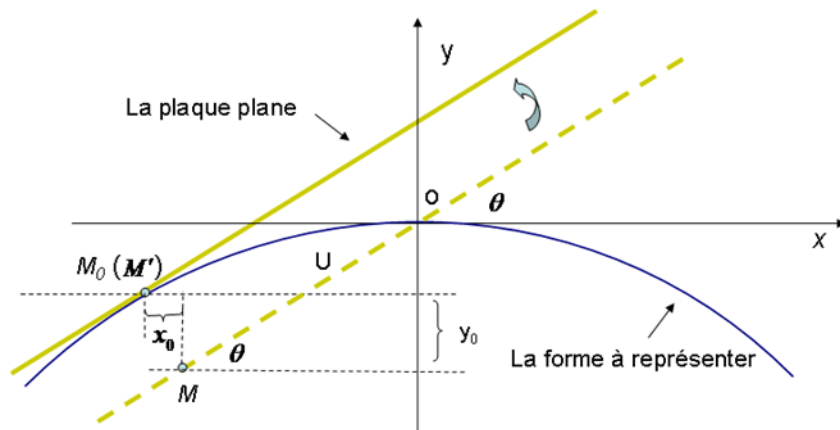


FIGURE 2.14 – Illustration de la compensation de position. La ligne pointillée représente la position de la plaque dans le modèle de mouvement sans compensation, la ligne continue représente la plaque dans le modèle de mouvement avec compensation de la position. La position du point de contact coïncide avec celle du point à restituer.

Pour un point de contact donné, les déplacements sont définis par :

$$d_0 \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = M' \begin{bmatrix} x_{M'} \\ y_{M'} \end{bmatrix} - M \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Comme le point M' et le point M_0 coïncident, nous avons :

$$M' \begin{bmatrix} x_{M'} \\ y_{M'} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_{M_0} \\ y_{M_0} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

En remplaçant M' par M_0 , l'Eq. 2.14 devient :

$$d_0 \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = M_0 \begin{bmatrix} x_{M_0} \\ y_{M_0} \end{bmatrix} - M \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Où M_0 peut être obtenu à partir de l'Eq. 2.3 et l'Eq. 2.5, et M à partir de l'Eq. 2.9. Finalement, nous obtenons :

$$d_0 \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cdot \sin(\frac{U}{R}) - U \cdot \cos \theta \\ -\frac{4H}{L^2} \cdot \left[R \cdot \sin(\frac{U}{R}) - \frac{L}{2} \right] \cdot \left[R \cdot \sin(\frac{U}{R}) + \frac{L}{2} \right] - H - U \cdot \sin \theta \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Après avoir calculé les déplacements de la plaque, nous avons la nouvelle évolution de la position angulaire de la plaque dans ce modèle (Figure 2.15). Ce modèle nécessite également trois degrés de liberté : un DDL en rotation, un DDL en déplacement selon la composante x et un DDL en déplacement selon la composante y . Comme la trajectoire de déplacement du doigt coïncide avec le profil géométrique de la forme à représenter, la kinesthésie du poignet et du bras est très semblable à celle du geste réel. Ce modèle peut donc sembler plus naturel que le modèle sans compensation dans la perception de forme.

b. Examenation de la vitesse du point de contact

Par rapport au modèle de mouvement sans compensation, ce modèle de mouvement avec compensation de la position respecte non seulement l'orientation locale de la forme, mais aussi l'information de position (ici, c'est le profil géométrique de la forme) grâce aux déplacements supplémentaires de la plaque dans le sens horizontal et vertical. Compte tenu de ces déplacements supplémentaires, il est nécessaire d'examiner également la vitesse du point de contact dans ce modèle. La vitesse est donnée par (le calcul détaillé est en Annexe **B**) :

$$v_{M'} \in plaque = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{U}{R}\right) \cdot \dot{U} - \dot{U} \cdot \cos \theta \\ -\frac{8H \cdot R}{L^2} \cdot \sin\left(\frac{U}{R}\right) \cdot \cos\left(\frac{U}{R}\right) \cdot \dot{U} - \dot{U} \cdot \sin \theta \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Afin d'avoir une impression plus intuitive, l'évolution de cette vitesse sur les composantes x et y est donnée dans la figure 2.16. On peut constater que la vitesse du point de contact est beaucoup plus petite que celle dans le modèle sans compensation (voir le figure 2.11). C'est-à-dire, ce modèle compense non seulement la position, mais aussi une partie de la vitesse.

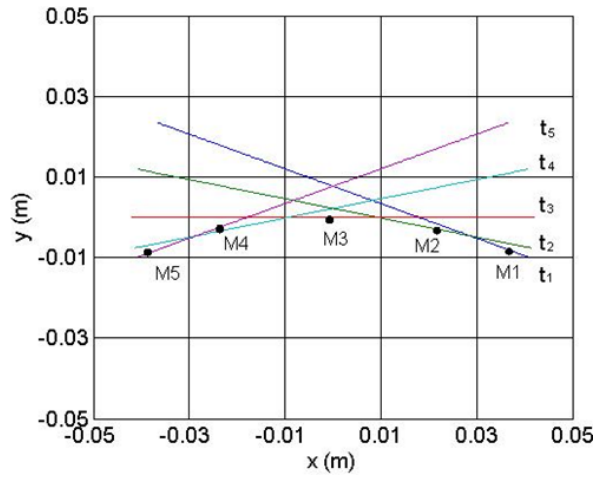


FIGURE 2.15 – Evolution de la position angulaire de la plaque plane suivant le modèle de mouvement avec compensation de la position.

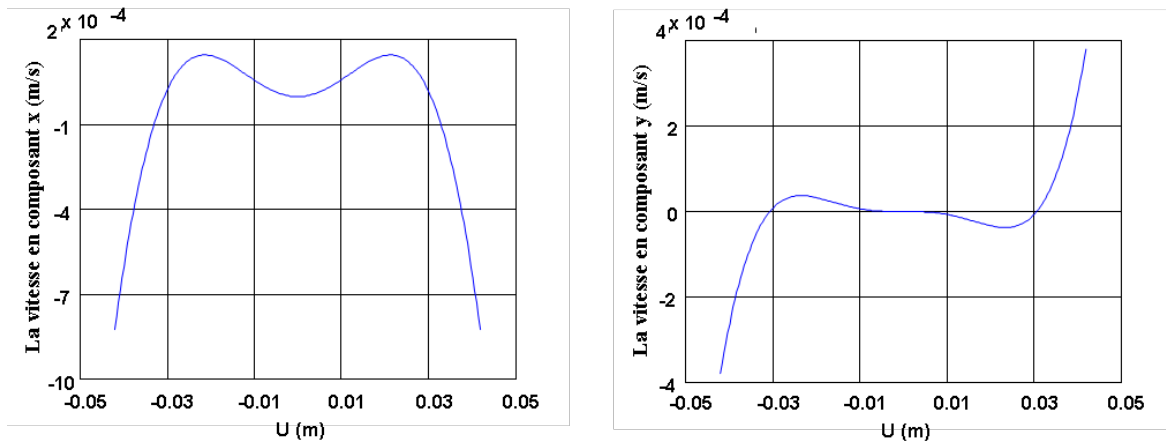


FIGURE 2.16 – Evolution de la vitesse du point de contact selon les composantes x et y dans le modèle de mouvement avec compensation de la position.

2.4 Conclusion

Nous avons caractérisé dans ce chapitre les modèles de mouvement d'une plaque plane destinée à restituer la perception de forme. L'idée est d'orienter, d'élever et déplacer une plaque plane en sorte que cette plaque soit toujours tangente à une forme virtuelle au point de contact lors de l'exploration manuelle. Le sujet discrimine la courbure d'une forme virtuelle grâce à un toucher dynamique et actif, par un mouvement d'avant en arrière du doigt le long de cette plaque plane.

Dans une première partie, nous avons d'abord introduit la psychophysique de la forme. La position, l'orientation locale et la courbure locale sont les descripteurs d'une forme. Plusieurs études ont prouvé que l'orientation de la surface locale est la principale source d'information pour le retour de forme. Nous avons également distingué le toucher statique et le toucher dynamique, aussi le toucher passif et le toucher actif. Puis, trois approches pour obtenir la sensation de forme ont été exposées : la perception de forme à partir d'un champ de forces, la perception de forme par le glissement, et la perception de forme à partir d'une déformation cutanée distribuée.

Dans une deuxième partie, nous avons étudié le modèle de mouvement d'une plaque plane destinée à restituer la forme. Par apport aux travaux de Wijntjes et al. exposés en première partie de chapitre, et qui se placent dans des conditions où le doigt du sujet demeure fixe par rapport à une plaque, notre étude permet à l'utilisateur de déplacer librement son doigt sur une plaque plane. Compte tenu du déplacement de la plaque contrôlé et du doigt de l'utilisateur, une vitesse relative apparaît au niveau du contact, qui n'est pas forcément en rapport avec la vitesse relative doigt-surface en conditions de contact réelles. Trois modèles de mouvement de la plaque ont alors été proposés et analysés. Ce sont les modèles de mouvement sans compensation, le modèle de mouvement avec compensation de la vitesse et le modèle de mouvement avec compensation de la position.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous attacher à concevoir un dispositif capable de restituer la sensation de forme en employant les différents modèles de mouvement de la plaque et effectuer l'évaluation de ce dispositif en comparant les performances obtenues avec chaque modèle de mouvement au cours des tâches de discrimination de forme incurvée.

Chapitre 3

Conception et évaluations du dispositif à retour de forme

Sommaire

3.1	Introduction	54
3.2	Conception du dispositif à retour de forme	54
3.2.1	Détermination et spécification du cahier des charges	54
3.2.2	Réalisation du dispositif	55
3.3	Commande du système	57
3.3.1	Interprétation du contrôle par le concept de “HIL”	57
3.3.2	Structure de commande	60
3.3.3	Estimation de la position du doigt en utilisant le capteur de force	65
3.4	Evaluations psychophysiques de la simulation de forme	66
3.4.1	Expérience 1 : première évaluation de la performance du dispositif	67
3.4.2	Expérience 2 : mesure du seuil différentiel de la courbure en utilisant une référence plate	70
3.4.3	Expérience 3 : comparaison des trois modèles du mouvement et la condition réelle	75
3.4.4	Expérience 4 : comparaison de la forme simulée et de la forme réelle à l’aide du JNDs	80
3.4.5	Discussion général sur les expériences	83
3.5	Conclusion	84

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur la conception et la commande d'un dispositif capable de restituer la perception de forme. Nous avons vu dans le chapitre précédent que l'orientation locale de la surface est l'information dominante pour simuler une forme. Par conséquent, le dispositif à concevoir doit respecter cette information pendant l'exploration, à chaque point de contact.

Dans une première partie de ce chapitre, nous allons tout d'abord déterminer le cahier des charges conceptuel du dispositif, puis nous présenterons les choix technologiques que nous avons effectués pour sa réalisation. Les lois de commande du système seront également discutées.

Des expériences psycho-physiques seront effectuées afin d'évaluer les performances du dispositif. En particulier, trois modèles du mouvement de plaque étant introduit au chapitre 2 pour reproduire une forme, nous allons effectuer des expériences comparatives en testant les trois contrôles correspondant, ceci afin de vérifier l'hypothèse émise et selon laquelle la différence de condition de contact, en termes de vitesse et de position peut nuire à la fidélité de la reconstitution [ZGLSA11].

3.2 Conception du dispositif à retour de forme

Nous allons concevoir une interface qui peut orienter, élever et translater une plaque plane en sorte que cette plaque soit toujours tangente à une forme virtuelle au point de contact lors de l'exploration manuelle. L'observateur perçoit la sensation de forme par le déplacement de son doigt d'avant en arrière et vice versa le long de cette plaque (Figure 2.6a).

3.2.1 Détermination et spécification du cahier des charges

L'objectif de cette partie est de déterminer les éléments du cahier des charges qui permettent de répondre aux contraintes de degré de liberté, de dimensionnement de la plaque plane et de courses angulaire et linéaire. Ils tiennent compte aussi des contraintes de calcul de la position du doigt.

Degré de liberté : Comme nous l'avons décrit au chapitre 2, pour le modèle de mouvement sans compensation, le système n'a besoin que d'un degré de liberté en rotation. Mais si on considère les deux modèles de mouvement avec compensation, le système doit posséder trois degrés de liberté : le DDL de rotation, le DDL sur la composante x et le DDL sur la composante y . En conséquence le dispositif que nous allons concevoir est un système à trois degrés de liberté.

Dimensionnement de la plaque plane : La longueur de la plaque à explorer doit être adaptée à la géométrie de la famille de formes que nous souhaitons reproduire. En particulier, la longueur de la plaque doit correspondre à l'arc de forme haptique (Figure 2.7) mais aussi à celle du *Stimtac* [BGLS07] dont nous allons utiliser le retour de texture. Cette longueur est de $76mm$. Quand à la largeur, sa valeur est moins critique dans notre étude car nous avons limité les possibilités d'interaction au déplacement proximo-distal dans le sens de la longueur. Cette dimension est donc choisie similaire à celle de la version du *Stimtac* utilisée ici, c'est à dire $45mm$.

Courses angulaire et linéaire : La course angulaire signifie la plage de rotation de la plaque. Comme la plaque pivote autour de son point central afin de respecter l'orientation locale de la surface, l'angle de la plaque varie avec la position du doigt U . Selon l'Eq. 2.8, l'angle de rotation dépend de la longueur de l'arc U , de la longueur en L , de R défini en l'Eq. 2.6 et de H , la hauteur de l'arc. En considérant les valeurs maximales suivantes pour ces grandeurs :

- $U_{max} = 0.038m$; (c'est la longueur de la plaque divisée par 2)
- $L_{max} = 0.076m$; (la longueur de la plaque)
- $H_{max} = 0.01m$; (c'est un choix empirique pour avoir une courbure moyenne)
- $R_{max} = 0.5826m$; (défini par l'Eq. 2.6)

On définit un angle maximal de rotation égal à 27.8° .

D'autre part, si on utilise les modèles de mouvement avec compensation de la vitesse et de la position, il faut produire également des déplacements horizontaux et verticaux. Calculé selon l'Eq. 2.13 et l'Eq. 2.17, et selon les mêmes choix de valeurs maximales pour les grandeurs précédents, le déplacement horizontal maximal est de $4.2mm$, le déplacement vertical maximal est de $17.1mm$.

Contraintes du calcul de la position du doigt : Le mouvement de la plaque est contrôlé à partir de la position du doigt. Ainsi, la mesure rapide et précise de la position du doigt sur la plaque joue un rôle très important. Le capteur doit pouvoir fonctionner en temps réel et sa bande passante doit respecter la vitesse maximale du doigt. Une résolution élevée est également requise. Ces contraintes seront analysées avec les données du paragraphe suivant.

3.2.2 Réalisation du dispositif

Le prototype du dispositif est présenté la figure 3.1. Ce dispositif est composé principalement de quatre parties : une plaque plane (partie **A**) constituant l'effecteur final de l'interface homme-machine à explorer pour percevoir la forme. Cette plaque est passive pour l'instant, elle

sera remplacée à terme par le stimulateur *Stimtac*; un capteur de force/couple (partie **B**) pour mesurer la force et le couple appliqués par le doigt au point de contact. A partir des valeurs mesurées, la position du doigt sera calculée; deux *Novint Falcons*(partie **C**) pour orienter, élever et translater la plaque; et un ordinateur de bureau (partie **D**) pour contrôler les mouvements des deux *Falcons* et calculer la position du doigt.

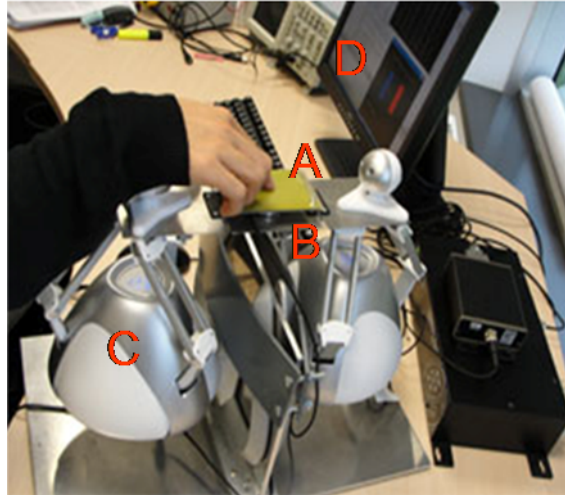


FIGURE 3.1 – Vue du dispositif. *A* est une plaque plane; *B* est un capteur de force sur 6 axes; *C* sont deux *Novint Falcons*; *D* est un ordinateur de bureau.

La plaque plane : Elle est en PVC avec une très bonne planéité de la surface. Cette interface est une surface continue qui permet au doigt de se translater librement d'avant en arrière et vice et versa.

Le capteur de force/couple (*ATI Nano 43, ATI industrielle Automation, USA*) : Il se trouve placé au-dessous de la plaque plane afin de mesurer la force et le couple appliqués par le doigt au point de contact. Les forces maximales mesurables sont de $18N$ sur l'axe x , l'axe y et l'axe z . Les couples maximaux sont de $250N - mm$. Les fréquences de résonances sont de $2300Hz$ (pour F_z, T_x et T_y) et de $2800Hz$ (pour F_x, F_y et T_z). Les spécifications répondent bien aux contraintes du calcul de la position du doigt en temps réel.

Deux *Novint Falcons* (*Novint Technologies, Albuquerque, NM, USA*) : Ils constituent la plateforme pour orienter, élever et translater la plaque plane. *Novint Falcon* est une interface haptique à retour de force avec trois degrés de liberté. Par rapport aux autres interfaces haptiques commerciales, il offre une solution à faible coût pour les développeurs. Ces spécifications techniques sont résumées dans le tableau 3. 1.

TABLE 3.1 – Spécifications techniques du *Novint Falcons*.

Espace de travail	$102 \times 102 \times 102(mm^3)$	Capacités de la force	$> 9N$
Résolution de position	$> 400dpi$	Dimension	$229 \times 229 \times 229(mm^3)$
Poids	$2.72kg$	Communication	USB 2.0

L'ordinateur de bureau : Il est en interaction avec l'utilisateur, la plateforme constituée des deux *Falcons* et le capteur de force. Il commande les mouvements de deux *Falcons* et calcule la position du doigt en temps réel à partir des forces et couples appliqués par le doigt et mesurés par le capteur de force. Il sera également amené à gérer les expériences psychophysiques

3.3 Commande du système

Après avoir présenté les matériels mis en jeu pour la conception du dispositif, nous allons maintenant nous attacher au problème de sa commande.

3.3.1 Interprétation du contrôle par le concept de “HIL”

L'objectif de cette partie est d'interpréter l'interaction doigt-surface réelle et doigt-surface virtuelle grâce à des outils développés initialement en ingénierie des systèmes, où le concept de “Hardware In the Loop” est utilisé pour tester des lois de commande [Bou09]. Sans vouloir jouer sur les mots, nous avons ici un système qui peut également se voir comme un système “Human In the Loop”, avec l'intervention conjointe de l'Homme et des machines [Bro10].

a. Représentation causale de l'interaction doigt-objet réel

Lorsque le doigt explore la surface d'un objet réel, il se déplace à sa surface et y applique une force. Si l'objet à explorer est rigide ou semi-rigide, dans la majorité des cas, l'utilisateur contrôle alors le déplacement de son doigt tangentiellement et normalement à la surface. Nous distinguerons donc les deux directions d'action : la direction normale à la surface et la direction tangentielle, voir la figure 3.2a. Par ailleurs, nous modélisons très simplement le doigt comme l'association d'une partie rigide (l'os), et d'une partie élastique (la pulpe) [Wie11], voir la figure 3.2b.

La représentation causale de l'interaction doigt-objet selon l'axe tangentiel est donc la suivante (Figure 3.3), avec l'intervention du cerveau qui contrôle le doigt en position. L'objet dans la direction tangentielle renvoie une force résistante de frottement qui dépend de son état de

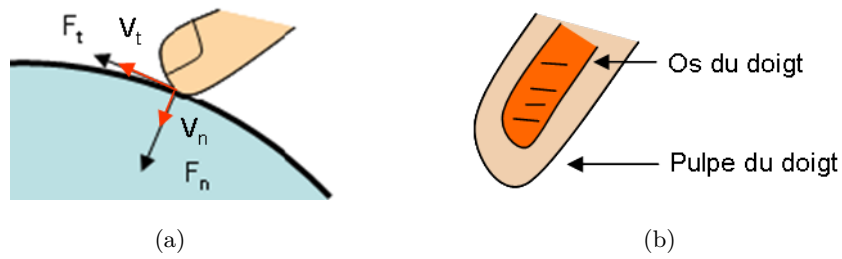


FIGURE 3.2 – a) La force du doigt sur l’axe tangential et sur l’axe normal ; b) Eléments considérés pour la modélisation du doigt.

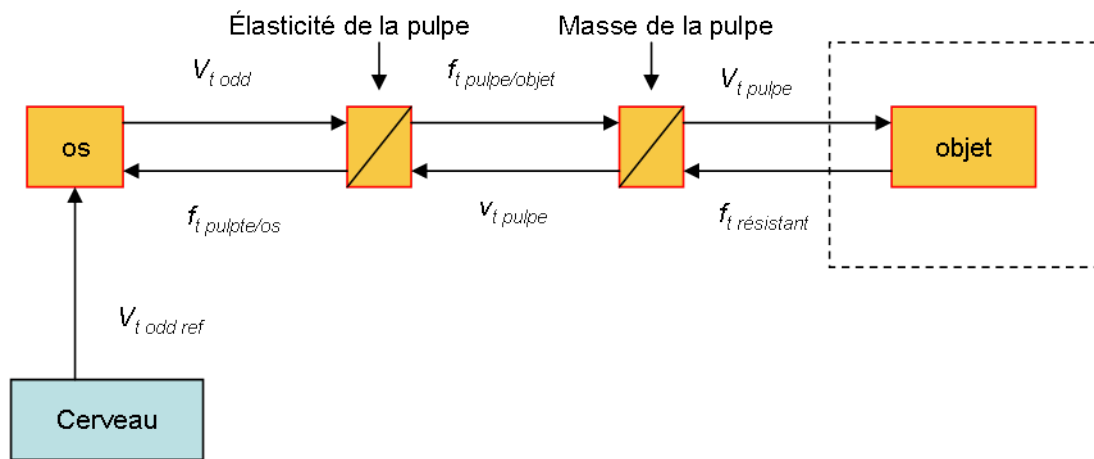


FIGURE 3.3 – La représentation causale de l’interaction doigt-objet selon l’axe tangential.

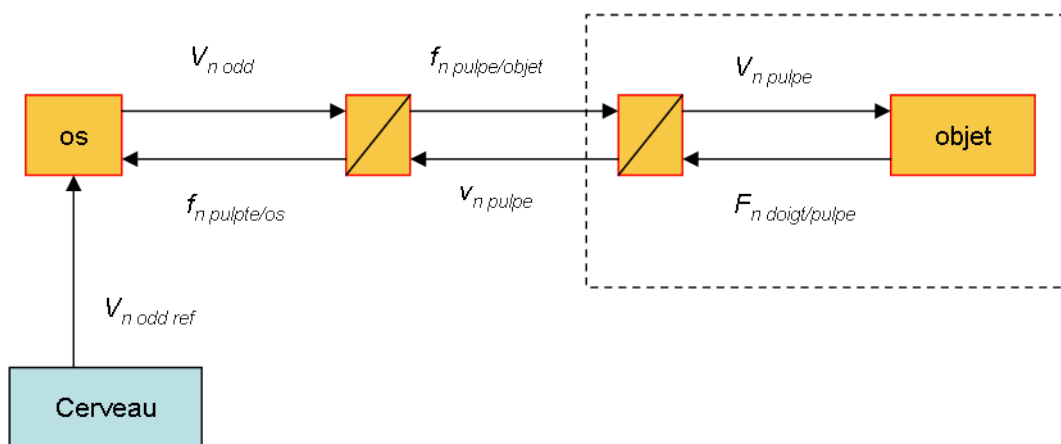


FIGURE 3.4 – La représentation causale de l’interaction doigt-objet selon l’axe normal.

surface. On distingue deux processeurs causaux, correspondant à l'élasticité de la pulpe et à sa masse. Le formalisme utilisé ici pour représenter les interactions est celui de la REM (Représentation Énergétique Macroscopique), développé au L2EP [Bou]. Son intérêt est de mettre en évidence les échanges énergétiques entre les systèmes, en respectant la causalité naturelle intégrale. La force tangentielle exercée par la pulpe sera ainsi fonction de l'intégrale de la différence des vitesses tangentielles de la pulpe et de l'os du doigt.

En ce qui concerne l'axe normal, le schéma est identique (Figure 3.4), même si l'objet impose cette fois une force résistante beaucoup plus importante que dans le cas tangentiel (sauf s'il est complètement mou ce qui n'est pas le cas étudié ici).

Il est à noter que les forces normales et tangentielles F_t et F_n sont liées par la loi de Coulomb $F_t = \mu F_n$.

b. Représentation de l'interaction doigt-objet virtuel par le concept de HIL

Pour compléter l'analyse de l'interaction doigt-effecteur, nous utilisons maintenant les outils du HIL (Hardware-in-the-Loop, qui dans notre cas est aussi du "Human-in-the-loop"). L'idée est de considérer que l'objet réel a été remplacé par le système à retour de forme décrit précédemment.

Sur l'axe normal, si nous reprenons le schéma de la figure 3.4 en remplaçant l'objet par l'effecteur final (la plaque plane), c'est la force résistante normale qu'il faudrait théoriquement contrôler pour simuler la réaction de l'objet au déplacement de la pulpe du doigt : contrôler la force en fonction de la position, ou contrôle en impédance. Or en fait, c'est un contrôle en position de la plaque, normalement à la surface simulée qui est effectué (contrôle en admittance). Ceci revient à remplacer l'objet mais aussi la masse de la pulpe par la fonction effecteur plaque, voir la figure 3.5.

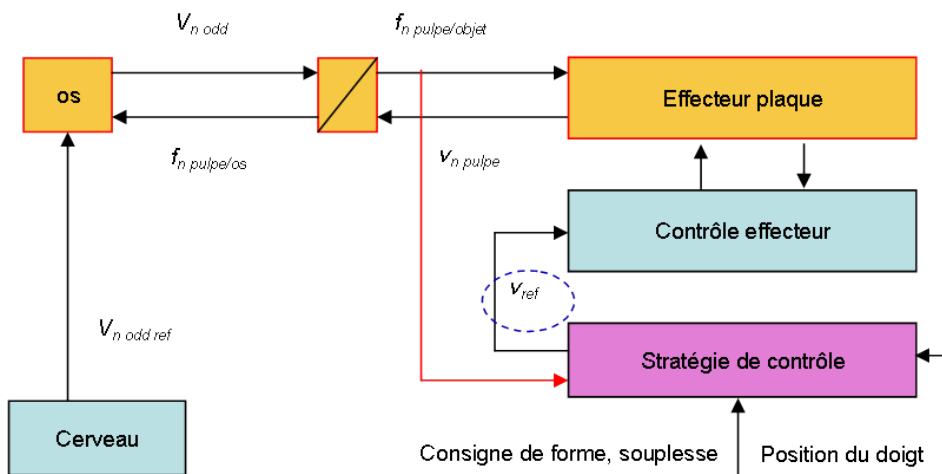


FIGURE 3.5 – La représentation HIL de l'interaction doigt-effecteur selon l'axe normal.

Selon la position du doigt sur la plaque (essentiel pour le retour de forme) ou selon la force appliquée (essentielle pour simuler une souplesse), la stratégie de contrôle consiste donc à générer la position de la plaque qui respecte la nature de l'objet simulé. Notons que la position n'étant pas une grandeur énergétique, c'est la vitesse qui apparaît dans la REM associée à l'axe normal.

Sur la voie tangentielle, à ce stade de la thèse nous ne contrôlons pas encore la force de frottement résistante, elle est égale par défaut à celle du couple de matériaux doigt-surface de la plaque plane. Nous reprendrons donc la représentation HIL sur l'axe tangentiel au chapitre 4, lorsque le contrôle du frottement de la plaque sera introduit.

3.3.2 Structure de commande

Nous allons maintenant nous focaliser sur la commande en position de la plaque plane. A partir des trois modèles de mouvement de la plaque plane analysés dans le chapitre 2, nous savons que le système possède au plus trois degrés de liberté : le DDL en rotation, le DDL sur la composante x et le DDL sur la composante y . Ainsi l'orientation de la plaque, la translation de la plaque et son élévation sont les sorties du contrôle. Quant aux entrées, ce sont la position du doigt (u) et la courbure de l'objet cylindrique virtuel à simuler (c). Le schéma de contrôle est détaillé la figure 3.6.

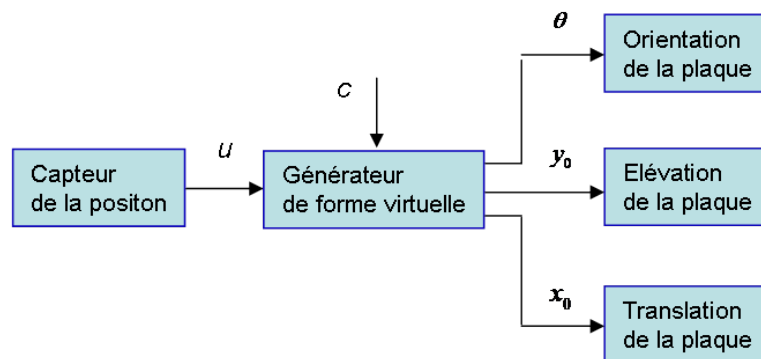


FIGURE 3.6 – Schéma de contrôle du système entier.

Pour orienter, élever et translater la plaque plane, nous avons employé deux *Novint Falcons*. Ils constituent la plateforme de mouvement (voir la figure 3.1). Pour imposer θ , x_0 et y_0 , il faut donc contrôler les deux *Falcons* en position. Chaque système *Novint Falcon* est fourni avec son logiciel de contrôle en force : on peut ainsi définir un vecteur force de référence, qui est traduit par un contrôle en courant au niveau de chaque actionneur équipant le système *Falcon*. De plus, la position de l'effecteur finale est calculée grâce à la connaissance des mesures issues des capteurs de positions sur chaque actionneur.

Pour notre application, le contrôle simultané des positions des deux *Falcons* selon les directions horizontale et verticale peut fournir les trois degrés de liberté de la plaque plane dont nous

avons besoin. Dans cette partie, nous allons détailler la loi de commande d'un système *Falcon* selon la direction horizontale et discuter de l'évaluation du contrôle. Ensuite, nous présenterons le contrôle simultané des deux systèmes *Falcon* afin d'obtenir la position désirée de la plaque plane.

a. Loi de commande d'un système *Falcon*

La méthode du contrôle employée est la commande par retour d'état, dont les paramètres seront réglés par la technique du placement de pôles. Nous ne présentons ici que la commande du système *Falcon* selon l'axe x . La forme de la représentation d'état est donnée par :

$$\dot{X} = AX + BU \quad (3.1)$$

On définit la matrice d'état :

$$X = \begin{bmatrix} \int x dt \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix}; \quad \dot{X} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Où x est le déplacement sur l'axe horizontal

Pour chaque système *Falcon*, la grandeur vectorielle contrôlée est le vecteur force, en fonction de la position. Si nous nous limitons dans notre exemple à l'axe x , en négligeant le frottement et les aspects élastique et amortissement, la relation force-déplacement s'écrit :

$$F_x = M \cdot \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3.3)$$

A partir de l'Eq 3.1, l'Eq. 3.2 et l'Eq. 3.3, nous obtenons la représentation d'état :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{M} \end{bmatrix} F_x \quad (3.4)$$

La commande par retour d'état consiste à trouver la bonne valeur de F_x afin de satisfaire la valeur de référence sur X . On a alors une entrée proportionnelle (au sens matriciel) à l'état :

$$F_x = K \cdot (X_{ref} - X) \quad (3.5)$$

avec $K = [K_1; K_2; K_3]$

Les racines du système asservi sont données par l'équation $\det [pI - (A - B \cdot K)] = 0$. Ces racines sont aussi celles du polynôme caractéristique de l'asservissement désiré. On obtient alors

les valeurs des composantes de la matrice de retour K qui vont permettre de placer les pôles du système à l'endroit désiré.

Le schéma-bloc du système contrôlé est donné par la figure 3.7. Il s'apparente à un système de contrôle PID.

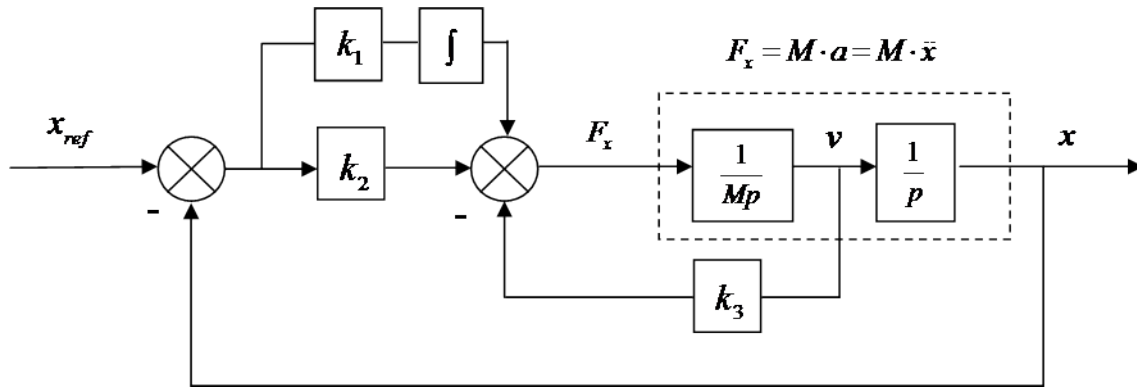


FIGURE 3.7 – Boucle de contrôle.

Notez que, dans la représentation d'état, il y a une partie différentielle. C'est la vitesse dans la boucle de contrôle. Nous la calculons à l'aide d'un estimateur (Figure 3.8).

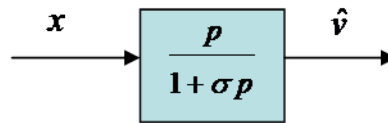


FIGURE 3.8 – Estimateur de la vitesse.

Dans le système discret, nous utilisons la transformation de *Tustin* afin de passer du domaine continu p au domaine discret z . La forme de la transformation s'écrit :

$$p = \frac{2}{T} \cdot \frac{1 - Z^{-1}}{1 + Z^{-1}} \quad (3.6)$$

En remplaçant le p dans l'estimateur de vitesse par l'Eq. 3.6, nous obtenons :

$$\frac{\hat{v}}{x} = \frac{p}{1 + \sigma p} = \frac{\frac{2}{T} \cdot \frac{1 - Z^{-1}}{1 + Z^{-1}}}{1 + \frac{2\sigma}{T} \cdot \frac{1 - Z^{-1}}{1 + Z^{-1}}} = \frac{2(1 - Z^{-1})}{(T + 2\sigma) + Z^{-1}(T - 2\sigma)} \quad (3.7)$$

Finalement,

$$\hat{v}(n) = \frac{2}{T + 2\sigma}(x(n) - x(n-1)) - \frac{T - 2\sigma}{T + 2\sigma} \cdot v(n-1) \quad (3.8)$$

b. Evaluation de la commande

Comme la connaissance de la vitesse joue un rôle important dans la loi de commande, nous évaluons d'abord son estimation à partir de l'approche précédente. La figure 3.9 représente la vitesse estimée par l'équation 3.8, à partir de la position sur x d'un système *Falcon*. La valeur de σ été choisie égale à 0.01 et la consigne de position était sinusoïdale. Ce résultat expérimental est acceptable, bien qu'il y ait de petites perturbations.

Nous testons ensuite la performance du contrôle en position d'un *Falcon* selon la loi de commande analysée précédemment. Quand une consigne de position sur l'axe x est donnée au *Falcon*, le *Falcon* suit cette consigne. La figure 3.10 montre la consigne et la sortie du système de contrôle. Il y a peu de différence entre la consigne et le déplacement réel. Cette évaluation montre que la loi de commande satisfait l'exigence du contrôle du *Falcon*.

c. Contrôle en position de la plaque à partir de deux *Falcon*

Après avoir défini la loi de commande en position d'un système *Falcon*, nous allons maintenant nous intéresser à l'orientation, l'élévation et le déplacement de la plaque à partir de deux *Falcons*. La figure 3.11 décrit le principe du contrôle de la plaque. La liaison entre la plaque et les deux *Falcons* est réalisée par deux charnières flexibles. Elles se déforment à la suite des déplacements de la plaque et des deux *Falcons*. Dans l'exemple donné figure 3.11, lors du passage de l'instant t_1 à l'instant t_2 , le *Falcon N°1* descend, et le *Falcon N°2* s'élève. En conséquence du déplacement des deux *Falcons*, la plaque pivote d'un angle θ , entraînée par les deux charnières flexibles.

Nous calculons maintenant les déplacements selon les axes x et y de chaque *Falcon* si on veut que la plaque pivote de θ . Pour le *Falcon N°1*, le déplacement est défini par :

$$\begin{cases} x_{N^{\circ 1}} = -r \cdot (1 - \cos \theta) \\ y_{N^{\circ 1}} = -r \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (3.9)$$

Pour le *Falcon N°2*, le déplacement est donné par :

$$\begin{cases} x_{N^{\circ 2}} = -r \cdot (1 - \cos \theta) \\ y_{N^{\circ 2}} = r \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (3.10)$$

Pour le modèle de mouvement avec compensation de la vitesse et le modèle de mouvement avec compensation de la position, outre ce mouvement de pivot, il faut considérer le déplacement horizontal et le déplacement vertical de la plaque. Dans ce cas, on impose des translations verticale et horizontale des deux *Falcons* dans le même sens simultanément, et les valeurs correspondantes sont calculées au chapitre 2.

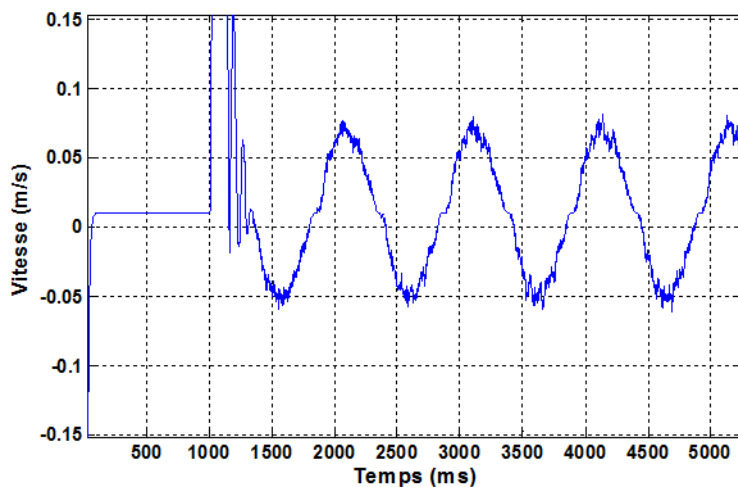


FIGURE 3.9 – Evaluation de la mesure de la vitesse avec la transformation de *Tustin*.

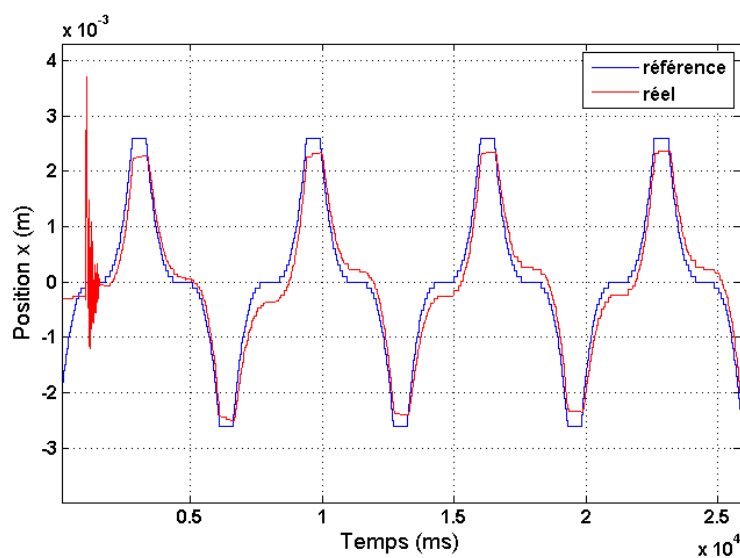


FIGURE 3.10 – Evaluation du contrôle. La ligne bleue est la consigne de la position sur l'axe x , la ligne rouge le déplacement réel du *Falcon*.

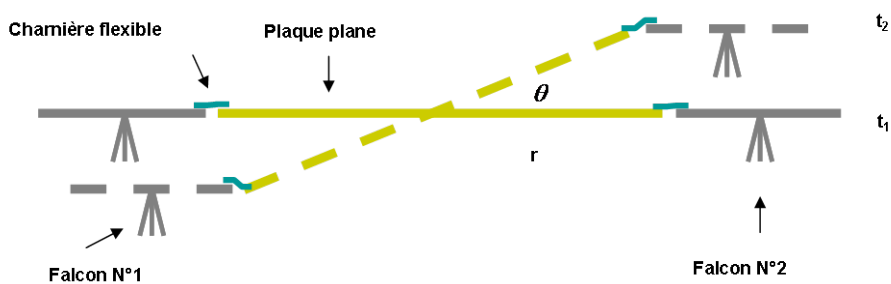


FIGURE 3.11 – Contrôle de la plaque à partir de deux *Falcons*.

3.3.3 Estimation de la position du doigt en utilisant le capteur de force

L'orientation de la plaque, l'élévation de la plaque et sa translation sont effectuées par les deux *Falcons*, mais l'angle de l'orientation et les déplacements sont calculés à partir de la position du doigt. Alors, la mesure de la position du doigt joue un rôle très important. Compte tenu de la géométrie du système, au lieu de mesurer directement la position du bout du doigt sur la plaque, nous la calculons à partir de la force et du couple appliquée sur la plaque au point de contact. Cette force et couple sont généralement mesurées par un capteur de force/couple sous la surface de contact [SSSS06] [SYU+09] [MGW+05]. Par exemple, [SSSS06] utilise un capteur de force avec 6-axes pour mesurer la position du doigt sur un dispositif qui fournit un retour tactile avec des picots. Dans notre dispositif, nous plaçons un capteur de force/couple nommé *ATI Nano43* sous la plaque afin de mesurer la force et le couple engendrés, selon le schéma de la figure 3.12.

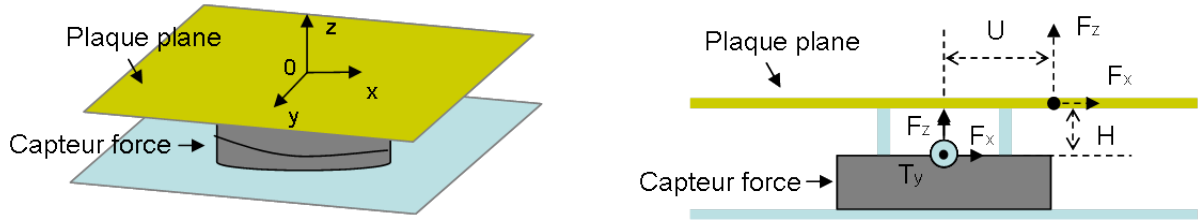


FIGURE 3.12 – Définition de la force et du couple à mesurer. U est la position du doigt. F_x et F_z représentés en lignes pointillées sont les forces qui s'appliquent par le doigt sur la plaque au point de contact. F_x et F_z représentés en lignes solides sont les forces mesurées par le capteur. T_y est le couple sur l'axe y . H représente la distance entre la plaque et le plan de référence du capteur.

Le couple T_y est dû à F_x et F_z . il s'écrit :

$$T_y = H \cdot F_x - U \cdot F_z \quad (3.11)$$

Si F_z n'est pas nulle, ce qui signifie que le contact existe entre le bout du doigt et la plaque, il est possible de calculer U à partir de la mesure de F_x , F_z et T_y . En inversant l'Eq. 3.11, nous obtenons :

$$U = \frac{H \cdot F_x - T_y}{F_z} \quad (3.12)$$

Nous avons également calculé la résolution de cette mesure. Le résultat obtenu par l'Eq. 3.12 est valable uniquement si l'utilisateur appuie sur la plaque avec une force F_z qui est

suffisamment grande pour être détectée. En fait, lorsque F_z tend vers zéro, les bruits de mesure sont amplifiés : l'Eq. 3. 12 engendre alors beaucoup d'erreurs. Afin d'estimer ces erreurs, il est possible de calculer la variation de U , nommée \tilde{U} , consécutive aux variations de F_x , F_z et T_y , nommées respectivement \tilde{F}_x , \tilde{F}_z et \tilde{T}_y :

$$\begin{aligned}\tilde{U} &= \frac{\partial U}{\partial F_x} \cdot \tilde{F}_x + \frac{\partial U}{\partial T_y} \cdot \tilde{T}_y + \frac{\partial U}{\partial F_z} \cdot \tilde{F}_z \\ &= \frac{H}{F_z} \cdot \tilde{F}_x - \frac{1}{F_z} \cdot \tilde{T}_y - \frac{H \cdot F_x - T_y}{F_z^2} \cdot \tilde{F}_z \\ &= \frac{H}{F_z} \cdot \tilde{F}_x - \frac{1}{F_z} \cdot \tilde{T}_y - \frac{U}{F_z} \cdot \tilde{F}_z\end{aligned}\quad (3.13)$$

La variation maximale est obtenue quand les variations sur chaque donnée mesurée sont additionnées. Par ailleurs, pour parvenir à une résolution donnée "*reso*", il est nécessaire d'avoir $\tilde{U} \leq reso$. Cela donne l'Eq.3.14 :

$$\tilde{U} \leq \frac{H}{\|F_z\|} \cdot \|\tilde{F}_x\| + \frac{1}{\|F_z\|} \cdot \|\tilde{T}_y\| + \frac{\|U\|}{\|F_z\|} \cdot \|\tilde{F}_z\| \leq reso \quad (3.14)$$

Finalement,

$$\|F_z\| \geq \frac{H \cdot \|\tilde{F}_x\| + \|\tilde{T}_y\| + \|U\| \cdot \|\tilde{F}_z\|}{reso} \quad (3.15)$$

L'Eq.3.15 peut être utilisée pour calculer la valeur minimale de F_z afin d'obtenir une donnée valide. Elle dépend des résolutions des mesures qui sont caractéristiques du capteur de force/couple. Pour l'ATI *Nano43*, nous avons :

- $\tilde{F}_x = \tilde{F}_y = 1/1024N$
- $T_y = 1/80Nmm$

Avec ces valeurs, et pour une valeur de *reso* égale à $200\mu m$, nous obtenons alors une force minimale F_z égale à $0.3N$. Cette valeur du seuil doit être comparé à la valeur classique de la force de pression, autour de $1N$ à $1.5N$, avec un mouvement libre du doigt.

3.4 Evaluations psychophysiques de la simulation de forme

Dans cette partie, nous évaluons le dispositif conçu dans le cadre de cette thèse afin d'avoir un aperçu de ses performances. L'évaluation des dispositifs haptiques consiste à identifier les relations existant entre un stimulus physique et la perception psychique qu'il provoque. Il y

a plusieurs méthodes psychophysiques qui servent en général en haptique à évaluer la perception des courbures (des formes), telles la comparaison de niveaux de similarité ou encore la discrimination des stimuli.

Quatre expériences sont effectuées pour évaluer le dispositif et tester les rôles de la compensation de la vitesse et de la compensation de la position dans la perception de courbure. La première expérience est une première évaluation de la performance du dispositif pour vérifier sa capacité à produire plusieurs formes (courbures) distinctes. La seconde expérience mesure le seuil différentiel de la courbure en utilisant une référence plate, sans courbure. La troisième expérience compare les sensations obtenues avec le dispositif contrôlé selon les trois modèles de mouvement et celles obtenues avec la forme réelle afin de déterminer quelle est la loi de mouvement la plus appropriée. La dernière compare la forme simulée avec la forme réelle afin d'examiner si notre dispositif peut afficher une forme qui est vraiment perçue comme étant convexe.

3.4.1 Expérience 1 : première évaluation de la performance du dispositif

Nous avons constaté, en changeant la courbure simulée (dans le modèle de forme haptique, cela correspond au changement de la hauteur H , voir la figure 2.7), qu'il est facile de reconnaître les formes avec différentes courbures. Cependant, on est en mesure de se demander si la courbure de la forme simulée est perçue de la même façon que la courbure d'une forme réelle. Nous allons donc comparer les courbures des formes simulées avec les courbures des formes réelles.

Pour savoir si les formes simulées correspondent, au niveau de la courbure, à des formes réelles, il est plus prudent, pour commencer, de simuler des formes où les courbures sont de niveau moyen, puisque qu'il est en général admis que la forme est perçue principalement par information géométrique. Comme cette expérience est la première évaluation, nous employons le modèle de mouvement le plus simple : le modèle sans compensation.

Nous faisons comparer cinq formes virtuelles simulées par le dispositif haptique dont les courbures sont différentes, avec cinq formes réelles qui ont les mêmes courbures respectivement. Pour chaque forme virtuelle, on demande aux sujets d'associer la forme correspondante parmi les formes réelles.

a. Les sujets

Dix sujets volontaires (six hommes et quatre femmes) participent à cette expérience. Ils n'ont pas de callosités, de tissu cicatriciel, ou d'autres signes de dommages sur la peau de leurs doigts et tous sont droitiers (selon le test de latéralité de Coren [Cor93]). Aucun des sujets n'avaient déjà participé à une étude connexe.

b. Stimuli

Pour les stimuli virtuels, nous utilisons le dispositif conçu pour produire les formes virtuelles. Selon le modèle de la forme haptique (voir la figure 2.7 dans Chapitre 2), le paramètre H peut définir la courbure. Donc, nous pouvons obtenir des courbures différentes en changeant la valeur de H . Nous nous donnons cinq valeurs de H , pour lesquelles, par le toucher actif, les sujets peuvent percevoir cinq formes virtuelles. Les courbures sont respectivement égales à $8.674m^{-1}$, $9.642m^{-1}$, $10.610m^{-1}$, $11.578m^{-1}$ et $12.546m^{-1}$.

Les stimuli réels sont cinq formes courbées à profil circulaire en plastique PVC (voir la figure 3.13). Ils sont longs de $76mm$ et larges de $29mm$. Tous a une hauteur de $35mm$ au milieu, indépendamment de leurs courbures différentes : $8.674m^{-1}$, $9.642m^{-1}$, $10.610m^{-1}$, $11.578m^{-1}$ et $12.546m^{-1}$. Pour donner le même sentiment de texture sur la surface, les cinq formes courbées sont recouvertes d'un film mince en plastique identique à celui qui recouvre la plaque plane du dispositif.



FIGURE 3.13 – Stimuli pour l'expérience 1. Les cinq formes courbées à profil circulaire ont respectivement les mêmes courbures que cinq formes virtuelles simulées par le dispositif conçu.

c. Protocole expérimental

Le modèle de mouvement utilisé dans cette expérience est celui avec un DDL de rotation, sans compensation de la vitesse ni compensation de la position. Avant de procéder à l'expérience, on demande aux sujets de se laver et de se sécher les mains, avec une attention particulière à l'extrémité des doigts. Pendant l'expérience, les sujets ne voient ni la plaque plane ni les cinq formes courbées.

Dans un premier temps, on demande à chaque sujet de mettre son doigt préféré sur la plaque plane et de le déplacer le long de sa surface avec des mouvements d'avant en arrière pour découvrir la forme virtuelle. On demande aussi au sujet d'essayer de maintenir une posture

digitale la plus naturelle ou confortable au cours de l’exploration, environ 45 degrés entre la plaque et sa phalange distale. Nous lui demandons d’employer une “force légère” afin de ne pas saturer le capteur de force sous la plaque ($18N$) et “une vitesse moyenne à $0.1m/s$ ”. Les sujets sont libres de passer autant de temps qu’ils le désirent pendant l’exploration.

Dans une deuxième étape, le sujet explore les formes courbées réelles pour comparer la forme simulée avec les cinq échantillons réels. Afin d’améliorer la procédure de reconnaissance des courbures, les cinq échantillons réels sont aléatoirement présentés avant le test et les cinq formes virtuelles sont simulées de manière aléatoire pendant le test. Après cette phase préliminaire, le sujet doit alors décider quelle forme réelle ressemble le plus, du moins pour sa courbure, à la forme virtuelle qui est vient de présentée.

Le test commence par un essai d’entraînement qui a pour but de familiariser le sujet avec les stimuli et la tâche demandée. Les réponses sont données pendant l’entraînement, par contre aucune correction n’est donnée pendant le test.

d. Résultats

Les résultats expérimentaux sont présentés dans le tableau 3.2. A partir de ces résultats, nous pouvons conclure que les sujets sont capables de distinguer clairement les formes virtuelles avec des courbures de $9.642m^{-1}$, $11.578m^{-1}$ et $12.546m^{-1}$ (les pourcentages des réponses correctes sont de 60%, 60% et 80% respectivement). Pour les formes virtuelles avec des courbures de $8.674m^{-1}$ et $10.610m^{-1}$, la ressemblance entre les formes virtuelles et réelles paraît nettement moins claire (40% et 30%). Cependant, parmi les réponses incorrectes, les sujets ont généralement choisi les courbures voisines.

TABLE 3.2 – Résultats d’évaluation : pourcentage des réponses correctes des ressemblances entre les formes virtuelles et les formes réelles.

Courbure des formes virtuelles	Courbure des formes réelles				
	8.674 m^{-1}	9.642 m^{-1}	10.610 m^{-1}	11.578 m^{-1}	12.546 m^{-1}
8.674 m^{-1}	40%	50%	10%	---	---
9.642 m^{-1}	10%	60%	30%	---	---
10.610 m^{-1}	---	40%	30%	20%	10%
11.578 m^{-1}	---	---	30%	60%	10%
12.546 m^{-1}	---	---	---	20%	80%

e. Discussion

Cette expérience a consisté à comparer cinq formes virtuelles avec cinq formes réelles dont les courbures sont identiques pour tester la performance du dispositif conçu. L'expérience a été réalisée en employant le modèle de mouvement à un DDL de rotation et avec des courbures au niveau moyen (de $8.674m^{-1}$ à $12.546m^{-1}$). Les résultats, prouvent d'une part une fois encore l'importance de l'information de l'orientation de la surface locale dans la perception de forme ; d'autre part, montrent que notre dispositif a une qualité satisfaisante pour la reproduction de la forme virtuelle.

3.4.2 Expérience 2 : mesure du seuil différentiel de la courbure en utilisant une référence plate

Dans cette expérience, nous mesurons le seuil de discrimination (ou seuil différentiel ou encore "JND" pour "just noticeable difference"). Nous utilisons une référence plate et mesurons donc la "courbe à peine perceptible" [WSHK09]. Dans [PKK99], Pont et al. ont mesuré le seuil de discrimination en utilisant des échantillons de surface courbés en PVC de longueur $20cm$ avec un toucher statique. Pour les stimuli d'ordre zéro (Figure 2.2), ils ont trouvé que les seuils de discrimination sont de $0.6mm$ à $3.2mm$ en termes de différence de hauteur de base à pic dans trois conditions de toucher (index-majeur-annulaire, index-majeur, majeur-annulaire). Pour les stimuli de second ordre, les seuils sont de $0.5mm$ à $1.0mm$. Wijntjes et al. [WSKH08] ont comparé les performances de discrimination haptique de la courbure entre les stimuli virtuels et réels par "la mesure de la courbe à peine perceptible". Les stimuli virtuels étaient générés par le dispositif qui s'appelle "Morpheotron", et les stimuli réels étaient les mêmes échantillons de surface courbés utilisés par Pont et al. Les résultats ont montré que la sensibilité humaine de courbure est essentiellement similaire pour les formes virtuelles et réelles. Les seuils de discrimination en moyenne qu'ils ont trouvés sont proches de $0.5m^{-1}$.

Distinct du dispositif "Morpheotron" qui ne nécessite pas le mouvement relatif du doigt sur l'effecteur final (plaque), notre dispositif permet au sujet d'effectuer un mouvement d'avant en arrière du doigt le long d'une plaque ; c'est donc un toucher dynamique et actif qui est en jeu pour reproduire la forme virtuelle. Il est alors intéressant de mesurer la courbe à peine perceptible en utilisant notre dispositif. Cette expérience est effectuée dans le cas le plus simple : nous employons le modèle de mouvement sans compensation.

a. Méthode

La mesure du seuil différentiel est employée pour mesurer la courbe à peine perceptible. Elle

nous paraît la méthode la plus adaptée, car cette expérience psychophysique renseigne sur la capacité de discrimination d'un sujet dans une situation donnée. Le seuil différentiel est un concept théorique de la psychophysique qui définit la limite en dessous de laquelle un individu ne parvient plus à différencier deux stimulations. On utilise aussi l'expression anglaise "just noticeable difference", abrégée en "JND" ou encore "differential limen", abrégé en "DL". Dans différents domaines de la perception, le seuil différentiel augmente avec le niveau de base de la stimulation. Selon la loi de Weber-Fechner, le ratio de ces deux quantités est constant :

$$\frac{\Delta I}{I} = k \quad (3.16)$$

où I est l'intensité de la stimulation de base, ΔI est le seuil différentiel, c'est-à-dire le plus petit incrément qui fait qu'une différence est perceptible entre la stimulation considérée et la stimulation de base et k est une constante dite "fraction de Weber" ou encore "rapport de Bouguer-Weber".

La détermination du seuil différentiel d'un individu repose sur une mesure statistique du seuil différentiel obtenu empiriquement au cours des multiples essais d'un protocole expérimental. En effet, puisque l'on cherche via le seuil différentiel à déterminer la limite des capacités du système sensoriel, les réponses données par le sujet sont toujours entachées d'une certaine variabilité. Un critère couramment utilisé pour définir le seuil différentiel de façon opérationnelle consiste donc à rapporter la valeur limite pour laquelle le sujet perçoit une différence dans 50% des essais ; mais on préfère parfois utiliser le seuil différentiel à 75%. La présentation graphique des résultats du seuil différentiel est donnée dans l'annexe C.

b. Les sujets

Huit sujets (cinq hommes et trois femmes) ont participé à cette expérience perceptive. Les sujets ne présentaient pas de callosités, de cicatrices, ou tout autre signe de lésion de la peau sur leur bout de doigt. Tous étaient droitiers.

c. Stimuli

Nous utilisons une référence plate comme l'étalon, c'est en fait la plaque plane du dispositif. Pour les échantillons de comparaison, ils sont générés par le dispositif en réglant le paramètre H. Nous nous servons de dix comparaisons pour l'étalon. Les formes virtuelles ont une courbure comprise dans l'ensemble suivant : $\{-2.0, -1.5, -1.0, -0.5, -0.25, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0\} m^{-1}$; notons donc que nous simulons des formes convexes mais aussi concaves.

d. Procédure expérimental

La tâche à effectuer est de discriminer, entre deux formes simulées par le dispositif, dont une est toujours la référence plate et l'autre une forme convexe, laquelle des deux est la plus convexe (pour la référence plate et les formes concaves, nous considérons que la référence plate est plus convexe). Afin de gérer l'expérience, nous avons élaboré une interface expérimentale en *OpenGL*. Sur l'écran de l'ordinateur qui contrôle le dispositif et gère l'expérience, deux rectangles côte-à-côte, colorés bleu et rouge sont affichés, pour représenter les deux formes simulées (Figure 3.14). L'un des deux rectangles correspond toujours à la forme étalon, présentée aléatoirement à droite ou à gauche, alors que l'autre correspond à l'une des formes de comparaison. La forme en train d'être explorée sur le dispositif conçu est représentée par un rectangle rouge alors que l'autre reste bleu. Les sujets utilisent les flèches orientées vers la droite et la gauche sur le clavier pour passer d'un rectangle à l'autre, ce qui met en même temps à jour la forme simulée sur le dispositif.

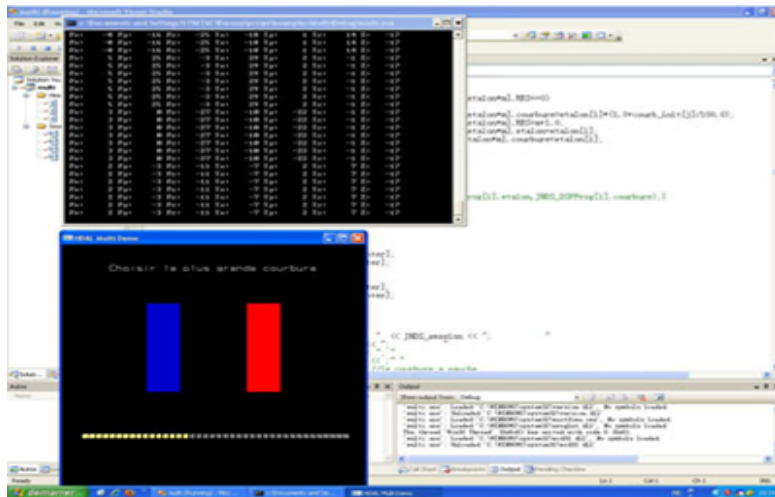


FIGURE 3.14 – Interface expérimentale. La consigne demandée aux sujets est “Indiquez laquelle est la plus convexe”.

On demande aux sujets de se laver et de se sécher les mains avant de commencer le test. Ils ne peuvent regarder le dispositif expérimental, surtout la plaque plane. La méthode pour explorer la forme virtuelle est la même que celle employée dans l'expérience 1. Les sujets utilisent leur main dominante pour explorer la surface de la plaque et l'autre main pour contrôler les échantillons virtuels à l'aide des flèches. Ils sont libres de passer d'un échantillon à l'autre autant de fois qu'ils le désirent et d'explorer chaque échantillon virtuel aussi longtemps qu'ils le veulent avant de taper “espace”, quand le rectangle rouge correspond à l'échantillon qu'ils considèrent comme celui le plus convexe. Après avoir tapé “espace”, deux nouveaux échantillons à discriminer sont présentés.

La barre de progression en bas de l'écran est incrémentée de façon à donner une indication sur le nombre de paires qu'il reste à distinguer. Toutes les données brutes sont envoyées dans un fichier texte pour un traitement statistique ultérieur.

Nous utilisons ainsi une méthode expérimentale qui s'appelle "Deux alternatives à choix forcé" avec le stimulus étalon constant. Le sujet est obligé de faire un choix entre deux stimuli, même si il ou elle ne peut pas détecter une différence. L'ordre des stimuli de test et de référence est aléatoire. Par conséquent, tout biais dû à des signaux non désirés est minimisé puisque les observateurs discriminent seulement la différence de courbure entre les stimuli. Pendant ce test, toutes les combinaisons entre la forme étalon et la forme de comparaison sont répétées 16 fois, ce qui signifie que chaque sujet effectue 160 essais (1 forme étalon \times 10 comparaisons \times 16 répétitions).

Le test commence par des essais d'entraînement ayant pour but de familiariser le sujet avec la tâche demandée. Les bonnes réponses sont données pendant l'entraînement, par contre aucune correction n'est donnée pendant le test.

e. Analyse des données et des résultats

A partir des données brutes, nous avons calculé pour chaque sujet, les pourcentages d'essais pour lesquels les sujets ont jugé que la forme virtuelle de comparaison avait une plus grande courbure que la forme virtuelle étalon. Sur un graphe dans lequel l'axe des abscisses porte les valeurs de courbure du stimulus de comparaison et l'ordonnée les probabilités de chaque réponse, nous avons tracé les points issus des réponses expérimentales et ensuite une fonction psychométrique pour filtrer ces points. Une transformation en *logits* peut être appliquée à la fonction psychométrique en supposant que cette dernière suive l'Eq.3.17 [GS88].

$$p(c) = \frac{1}{1 + \left(\frac{c}{\alpha}\right)^\beta} \quad (3.17)$$

où p représente la réponse de jugement en fréquence pour un test courbure c .

La figure 3.15 montre un exemple représentatif des points expérimentaux et la fonction psychométrique associée. C'est le résultat du test d'un des sujets. Sur l'axe horizontal sont reportées les courbures des formes de comparaison. Sur l'axe vertical sont placés les proportions de jugement pour lesquels la forme de comparaison a été jugée plus convexe que la forme étalon.

Le JND pour la forme étalon est défini comme la moyenne des seuils de différence supérieure et inférieure (JND^U et JND^L). Comme le montre la figure 3.15, JND^U représente la différence entre les probabilités de réponse 0,75 et 0,50; JND^L représente la différence entre les probabilités de réponse 0,50 et 0,25.

Les seuils différentiels pour les huit sujets et le seuil moyen sont reportés la figure 3.16.

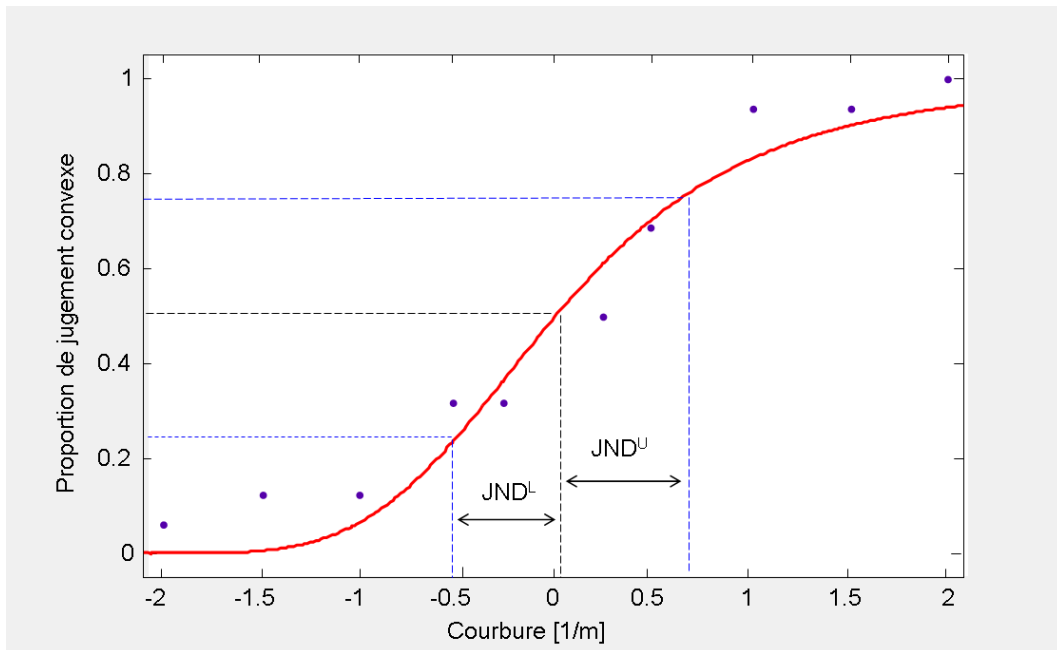


FIGURE 3.15 – Un exemple représentatif de points de données et la fonction psychométrique associée.

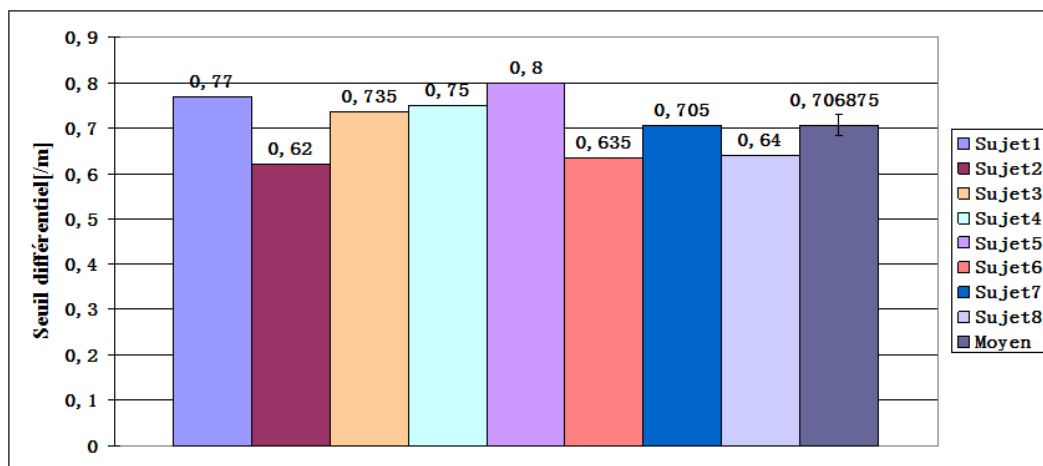


FIGURE 3.16 – Seuils différentiels individuels pour tous les sujets. Le seuil moyen et l'erreur standard sont indiqués.

f. Discussion

Nous mesurons la courbe à peine perceptible pour une référence plate dans le test. Le seuil différentiel moyen est proche de $0.7m^{-1}$. Il est semblable à celui trouvé par Pont et al. en utilisant des échantillons courbés en PVC de longueur de $20cm$ et à celui trouvé par Wijntjes et al. en utilisant le dispositif “Morpheotron”.

Cette expérience exige des performances élevées pour les équipements, car les indices indésirables tels que les vibrations, les instabilités de contrôle, les stick-slips, les artefacts mécaniques, ou même les nuisances auditives peuvent influencer la discrimination pour les sujets. Par exemple, si un sujet détecte une vibration transitoire parasite et qu’on lui demande lequel des deux stimuli est plat, il peut interpréter cette vibration comme un indice influençant la perception de la pente et la hauteur. Pour surmonter ce problème, nous avons employé une méthode expérimentale “deux alternatives à choix forcé avec le stimulus constant” et demandé aux sujets lequel des deux stimuli est plus convexe. Les sujets n’ont pas besoin de détecter quel stimulus est plat mais seulement de détecter le signe de la courbure. Cette procédure élimine toute possibilité que des signaux non désirés puissent influencer sur le seuil de discrimination. Il n’est donc pas nécessaire de tester si ces signaux étaient en fait présents dans l’expérience.

3.4.3 Expérience 3 : comparaison des trois modèles du mouvement et la condition réelle

Pour respecter l’information dominante de la forme (l’orientation de la surface locale), le modèle de mouvement de plaque avec un degré de liberté en rotation est suffisant. Mais pour limiter la vitesse de la plaque au point de contact au cours du mouvement de rotation, nous avons proposé le modèle de mouvement avec compensation de la vitesse. De plus, afin de respecter le profil géométrique de la forme à simuler, le modèle de mouvement avec compensation de la position a également été proposé. Parmi ces trois modèles, il est légitime de chercher à savoir lequel possède la meilleure performance dans la perception de la forme. Les compensations de vitesse et de position sont-elles vraiment nécessaires ? Pour répondre à cette question, nous allons mesurer les seuils différentiels pour une référence de courbure donnée et selon les trois lois de mouvement, à l’aide du JNDs. Le seuil différentiel en utilisant des formes réelles est également mesuré.

a. Les sujets

Huit sujets volontaires ont participé à cette expérience. Le groupe est constitué de 5 hommes et 3 femmes. Aucun des sujets n’avaient déjà participé à une étude similaire dans le do-

maine haptique concernant la perception de la courbure. Ils n'ont pas de callosités, de tissu cicatriciel, ou d'autres signes de dommages de la peau sur le bout des doigts. Tous sont droitiers.

b. Stimuli

Le dispositif conçu est utilisé pour simuler des formes virtuelles dans les conditions avec trois modèles du mouvement. Quant à la forme réelle, nous utilisons neuf échantillons de surface courbe (une forme de référence standard, huit formes de comparaison) avec le profil circulaire en PVC, voir la figure 3.17a. Ils ont la même dimension que ceux utilisés dans l'expérience 1. Ils sont également recouverts d'une même couche de film plastique mince que celle recouvrant la plaque plane de l'effecteur. Pour les trois conditions virtuelles et la condition réelle, la forme étalon a une courbure de $10.610m^{-1}$. Nous nous servons de huit formes de comparaison pour la forme étalon. Elles ont des courbures de comparaison comprises entre -20% et +20% de la courbure étalon, espacées d'un intervalle de 5% (-20%, -15%, -10%, -5%, 5%, 10%, 15% et 20%).

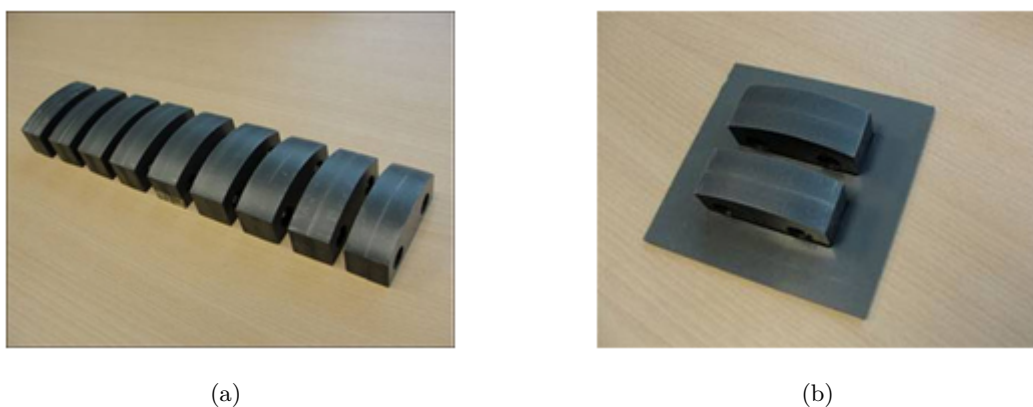


FIGURE 3.17 – a). Les neuf formes réelles dont une est la forme étalon et huit sont les formes de comparaison. Les formes sont fabriquées en PVC et recouvertes d'une couche de film mince. b). Une paire de formes réelles présentées aux sujets. L'un est l'échantillon étalon et l'autre échantillon de comparaison.

c. Procédure expérimentale

Nous mesurons séparément les seuils différentiels dans les conditions virtuelles avec trois modèles du mouvement de la plaque et dans une condition utilisant les formes réelles.

Pour les trois conditions virtuelles : Le protocole expérimental est presque le même que celui adopté dans l'expérience 2. Nous employons aussi la méthode expérimentale “deux

alternatives à choix forcé avec le stimulus constant”. La tâche à effectuer est de discriminer, entre deux formes virtuelles simulées, laquelle est la plus convexe. La courbure de la forme étalon cette fois-ci est de 10.610 m^{-1} . Pour chaque modèle de mouvement, la méthode de contrôle appliquée est différente afin de respecter les lois décrites au chapitre 2.

Pour la condition réelle : Au cours de l’expérience, dans chaque essai, une paire de stimuli est présentée au sujet : l’une est la forme réelle étalon et l’autre la forme réelle de comparaison (Figure 3.17b). L’ordre des stimuli étalon et de comparaison est aléatoire. Les sujets doivent juger laquelle est la plus convexe en répondant “la gauche” ou “la droite”. La condition réelle est uniformément distribuée parmi les trois conditions virtuelles.

Une série de tests est générée dans laquelle toutes les combinaisons sont explorées (trois conditions virtuelles et une condition réelle). Toutes les combinaisons des formes étalon et de comparaison sont répétées 16 fois, ce qui signifie que chaque sujet effectue 512 essais (4 formes étalons dans 4 conditions \times 8 comparaisons \times 16 répétitions). L’expérience est divisée en huit sessions qui contiennent chacune 4 blocs. Un bloc est constitué de 16 essais (1 forme étalon \times 8 comparaisons \times 2 répétitions) dans la même condition. Les quatre conditions sont effectuées dans chaque session. L’ordre de présentation des 4 conditions ainsi que l’ordre de présentation à l’intérieur des blocs sont aléatoires. Les sessions sont séparées au moins d’une demi-heure.

Cette expérience commence par une session d’entraînement qui a pour but de familiariser les sujets avec la tâche demandée. Pendant cette session, des explications détaillées sont données par oral à chaque sujet, pour les sessions suivantes les instructions sont abrégées. Les réponses sont données pendant l’entraînement, mais aucune correction n’est donnée pendant le test.

d. Résultats

Nous utilisons la même méthode que celle employée dans l’expérience 2 pour traiter les données brutes et calculer les JNDs. Les seuils différentiels moyens de huit sujets dans quatre conditions sont reportés dans la figure 3.18. Parmi eux, le seuil différentiel moyen pour le modèle sans compensation est supérieur aux autres seuils. Le seuil différentiel pour le modèle avec compensation de la position est le plus petit parmi ceux correspondant aux trois conditions virtuelles et proche de celui obtenu pour la condition réelle.

Pour donner une impression plus intuitive du seuil différentiel, les fractions de Weber pour la discrimination de courbure sont représentées la figure 3.19 en fonction des quatre conditions pour les huit sujets. Les fractions de Weber moyennes pour les quatre conditions sont respectivement de 8.83%, 8.10%, 6.83% et 6.22%. Pour le modèle sans compensation, la sensibilité de discrimination

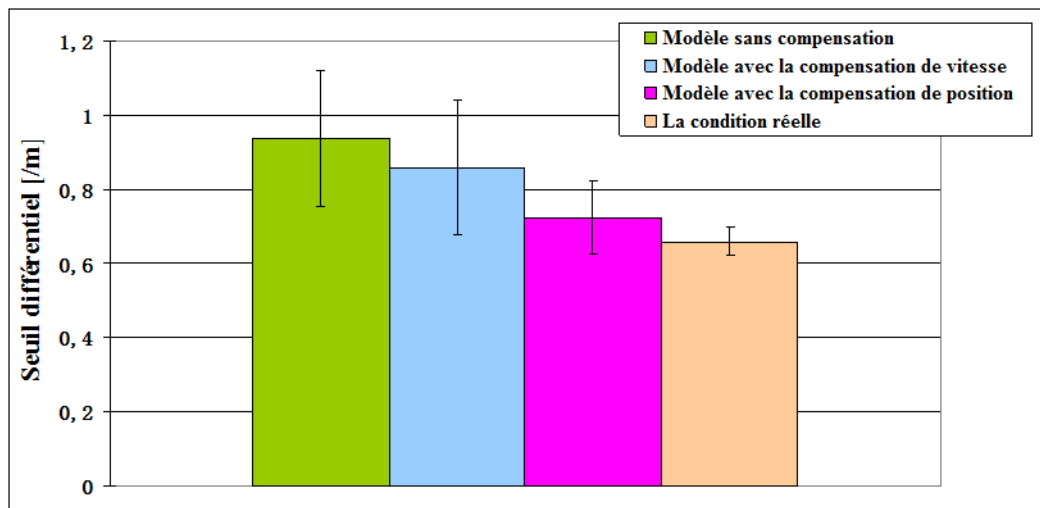


FIGURE 3.18 – Les seuils de discrimination moyens dans les quatre conditions. Les barres d’erreur représentent un intervalle de confiance à 95%.

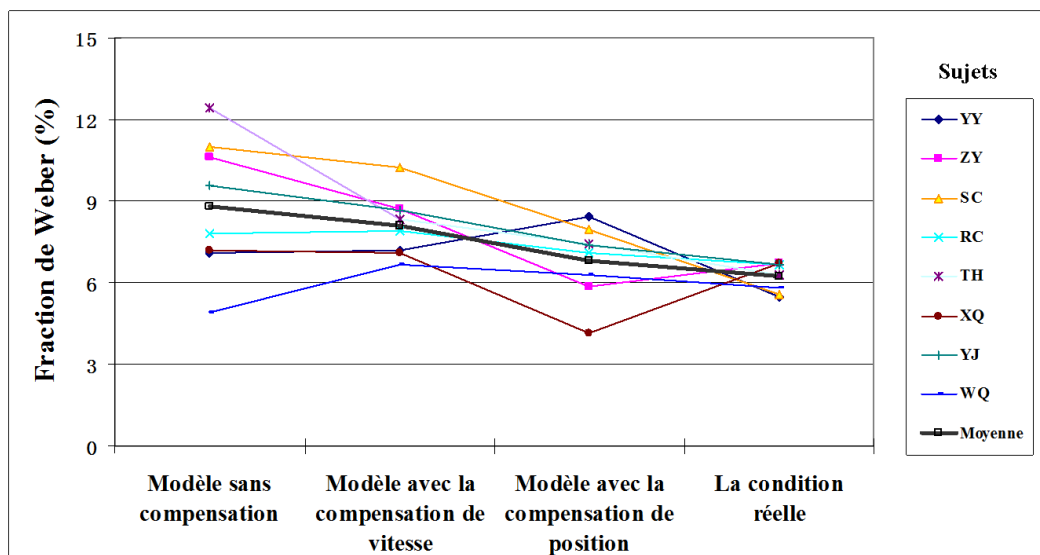


FIGURE 3.19 – Fraction de Weber pour la discrimination de la courbure pour tous les sujets dans quatre conditions. Les résultats moyens sont aussi représentés.

est fortement différente selon les sujets. Pour les modèles avec compensation de la vitesse et de la position, la sensibilité de discrimination est sensiblement la même selon les sujets. Et les sujets ont presque tous la même sensibilité de discrimination pour la condition réelle.

Une analyse de la variance des mesures (ANOVA) est ensuite effectuée pour analyser plus en détail l'effet du modèle de mouvement de la plaque sur la fraction de Weber. L'analyse de la variance montre un effet significatif pour les trois modèles de mouvement et la condition réelle ($F_{3,21} = 6.23; p < 0.004$).

Le t-test montre une différence significative entre la condition où le modèle sans compensation est employé et la condition réelle ($t_7 = 3.013; p = 0.020$), de même entre la condition avec modèle utilisant la compensation de la vitesse et la condition réelle ($t_7 = 4.172; p = 0.004$). Par contre, aucune différence significative n'existe entre la condition avec modèle utilisant la compensation de la position et la condition réelle ($t_7 = 0.985, p = 0.357$).

e. Discussion

Cette expérience permet de déterminer les seuils différentiels de la courbure dans les trois conditions virtuelles (obtenues en changeant les modèles du mouvement de la plaque) et la condition avec les formes réelles. Elle est réalisée dans des conditions de toucher dynamique et actif.

Les fractions de Weber moyennes pour les quatre conditions sont respectivement de 8.83%, 8.10%, 6.83% et 6.22%. L'analyse d'ANOVA montre que le modèle du mouvement possède un effet significatif dans la perception de courbure. De plus, le t-test montre que, parmi les trois conditions virtuelles avec différents modèles du mouvement, seule la condition où le modèle avec compensation de la position est employé ne possède aucune différence significative sur la fraction de Weber par rapport à la condition réelle. Cela nous permet de conclure que le modèle du mouvement avec compensation de la position amène une meilleure performance dans la simulation de la forme courbée. Comparé avec le modèle sans compensation, ce modèle non seulement respecte l'information dominante (l'orientation de la surface locale), mais aussi le profil géométrique. Avec ce modèle, la trajectoire d'exploration coïncide avec le profil de la forme à reconstituer. Par rapport au modèle avec compensation de la vitesse, ce modèle compense également une grande partie de la vitesse, voir la figure 2.16.

La fraction de Weber pour le modèle de mouvement avec compensation de la position est très proche de celle de la condition réelle (6,83% et 6,22% respectivement). Ce résultat indique que, au niveau de la courbure moyenne (dans notre expérience, la courbure de référence standard est de $10.610m^{-1}$), la sensibilité humaine de discrimination à la courbure est similaire pour les formes virtuelles et réelles. Cette conclusion est la même que celle trouvée dans [WSKH08], en utilisant une forme de référence plate.

3.4.4 Expérience 4 : comparaison de la forme simulée et de la forme réelle à l'aide du JNDs

L'objectif de cette expérience est d'analyser si notre dispositif, contrôlé par la loi de mouvement avec compensation de la position, est capable d'afficher une forme qui soit vraiment perçue comme étant courbée. L'expérience 3 a prouvé que ce modèle de mouvement avait un seuil différentiel de discrimination d'une courbure étalon faible et similaire à celui obtenu dans les conditions réelles. Cependant, trouver des seuils de discrimination semblables ne démontre pas que la forme simulée soit vraiment perçue comme étant courbée comme la forme réelle. C'est un résultat au niveau de la discrimination, pas au niveau de la ressemblance.

Pour le savoir, nous comparons directement les formes simulées à la forme réelle. L'expérience de détermination du seuil différentiel est employée. Cette fois-ci, le stimulus étalon est une forme réelle, et les formes de comparaison sont des formes virtuelles. Les observateurs déterminent les points d'égalité subjective (PSE) (voir Annexe C) entre les formes virtuelles et réelle.

a. Les sujets

Huit sujets volontaires ont participé à cette expérience. Le groupe est constitué de 4 hommes et 4 femmes dont l'âge est compris entre 25 et 29 ans. Tous les sujets sont étrangers au domaine de la reconstitution haptique. Ils n'ont pas de callosités, de tissu cicatriciel, ou d'autres signes de dommages de la peau sur le bout des doigts et tous sont droitiers.

b. Stimuli

L'échantillon étalon est une forme réelle en PVC comme celles utilisées dans les expériences antérieures (Figure 3.20). Elle a une courbure de $10.610m^{-1}$ et est recouverte d'un film. Les échantillons de comparaison sont les formes virtuelles simulées par le dispositif. Ils ont des courbures de comparaison entre -20% et +20% de la courbure étalon, espacées par un intervalle de 5% (-20%, -15%, -10%, -5%, 5%, 10%, 15% et 20%).

c. Procédure expérimentale

Les sujets sont isolés visuellement des stimuli. Dans chaque essai, on leur présente une paire de stimuli côté à côté : l'un est une forme réelle et l'autre une forme virtuelle simulée par le dispositif. Après les avoir explorées, les sujets doivent décider lequel des deux stimuli est perçu plus convexe. On leur demande de répondre "la droite" (la forme réelle) ou "la gauche" (la forme

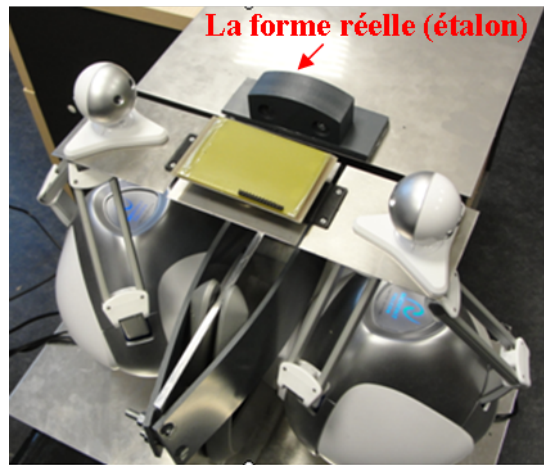


FIGURE 3.20 – Stimuli pour l’expérience 4. L’échantillon étalon est la forme réelle.

virtuelle de comparaison). Lors de l’examen des points de l’égalité subjective, il faut s’assurer que la seule condition expérimentale variable est celle de l’enquête, ici, c’est la différence de courbure. Les autres conditions doivent être gardées identiques. Comme les deux stimuli ne peuvent pas être présentés strictement au même endroit, l’espace entre eux est minimisé dans la mesure du possible. La forme réelle est fixée à droite de la plaque du dispositif.

Pendant ce test, toutes les combinaisons entre la forme étalon et la forme de comparaison sont répétées 16 fois, ce qui signifie que chaque sujet effectue 128 essais (1 étalon \times 8 comparaisons \times 16 répétitions). Avant le test, les sujets effectuent dix essais d’entraînement pour se familiariser à la tâche. Comme nous sommes intéressés par le biais de perception entre les deux stimuli, ce qui est une bonne réponse n’est pas défini. Par conséquent, aucune correction n’est donnée ni pendant l’entraînement, ni pendant le test.

d. Résultats

Comme pour le traitement des données dans les expériences 2 et 3, nous avons calculé également les proportions de jugement convexe pour lesquels les sujets ont jugé que la forme virtuelle de comparaison avait une plus grande courbure que la forme étalon. Nous avons ajouté aussi la fonction psychométrique.

Nous nous focalisons sur la différence entre la courbure de la forme étalon et la courbure de la forme simulée pour laquelle la fonction psychométrique est égale à 0.5. Le biais de perception μ est défini par l’équation suivante :

$$\mu = C_{\text{étalon}} - C_{\text{virtuelle}} \quad (3.18)$$

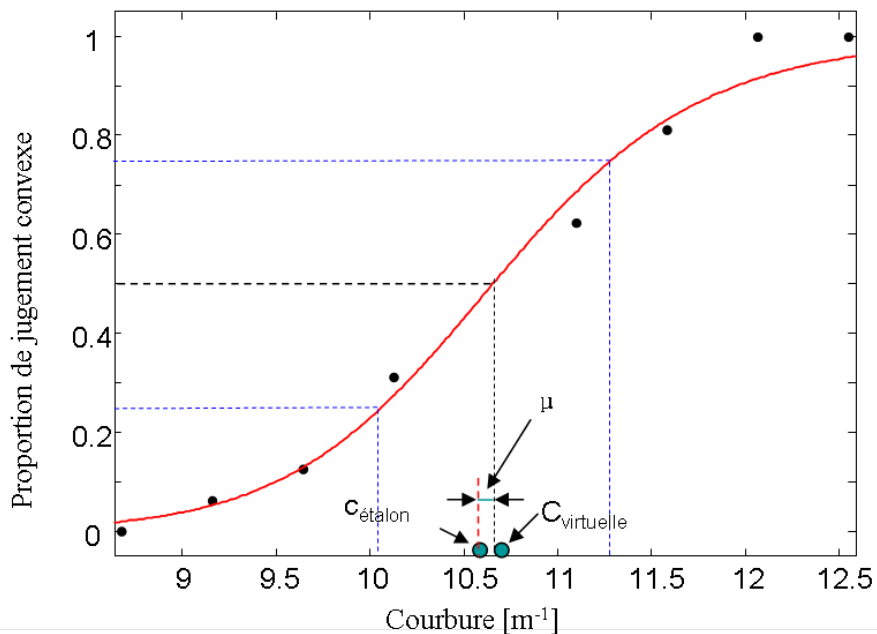


FIGURE 3.21 – Un exemple représentatif de biais entre la courbure de la forme étalon et la courbure de la forme rendue.

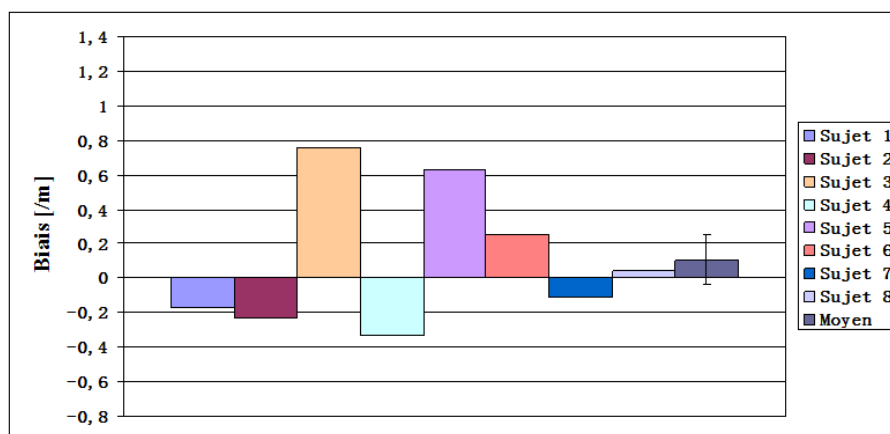


FIGURE 3.22 – Biais individuel et moyen pour huit sujets. La barre d'erreur indique l'erreur standard.

où $C_{\text{étalon}}$ représente le courbure de la forme étalon, $C_{\text{virtuelle}}$ la courbure de la forme simulée qui correspond au Point d’Egalisation Subjective (PES), voir la figure 3.21.

Les biais individuel et moyen pour tous les huit sujets sont présentés dans la figure 3.22. Trois sujets ont les biais positifs et les autres les biais négatifs. Le biais moyen est de $0.105m^{-1}$.

E. Discussion

Dans cette expérience, nous avons mesuré le biais de perception. Plus le biais est faible, plus le dispositif est performant dans sa restitution. Si la forme réelle et la forme virtuelle étaient perçues avec la même courbure, il n’y aurait pas de biais, à savoir, $\mu = 0m^{-1}$. Le biais moyen trouvé dans l’expérience est de $0.105m^{-1}$. Par rapport à la courbure étalon ($10.610m^{-1}$), cette valeur est faible (1%).

Les biais individuels positifs et négatifs sont quasiment répartis de manière égale. Cela signifie que les sujets n’ont pas systématiquement jugé une forme restituée avec une courbure supérieure ou inférieure à celle de la forme réelle. Le résultat de cette expérience montre donc que le dispositif contrôlé selon le modèle du mouvement avec compensation de la position peut afficher une forme virtuelle réellement perçue comme étant courbée.

3.4.5 Discussion général sur les expériences

Nous avons effectué quatre expériences afin d’évaluer notre dispositif et testé les trois modèles du mouvement de la plaque dans la perception de courbure.

Les expériences 1 et 2 se sont concentrées sur l’évaluation du dispositif. L’expérience 1 a prouvé que le dispositif conçu est capable de produire plusieurs formes virtuelles distinctes avec des courbures de niveau moyen (de $8.674m^{-1}$ à $12.546m^{-1}$), en respectant l’orientation de la surface locale. L’expérience 2 a mesuré la courbe à peine perceptible pour une référence plate. Le seuil différentiel moyen (proche de $0.7m^{-1}$) montre que le dispositif peut afficher une forme virtuelle peu convexe ou concave distincte d’une plaque plane dans une certaine échelle d’exploration (environ $76mm$).

Les expériences 3 et 4 se sont focalisées sur l’évaluation des trois modèles du mouvement de la plaque. L’expérience 3 a examiné les seuils différentiels d’une courbure dans les trois conditions virtuelles en changeant les modèles du mouvement et la condition réelle avec les formes réelles. Les résultats montrent que le modèle de mouvement avec compensation de la position est le meilleur, celui pour lequel la fraction de Weber est très proche de celle de la condition réelle. L’expérience 4 a comparé les formes rendues dans la condition où le modèle avec compensation de la position est employé avec la forme réelle. Le faible biais moyen obtenu montre que le dispositif utilisant le modèle du mouvement avec compensation de la position peut afficher une

forme virtuelle qui est vraiment perçue comme étant courbée.

Dans toutes les expériences, les formes virtuelles étaient simulées par le dispositif en explorant la plaque plane par les sujets. Ce qui semble être important pour la simulation de forme, c'est le contrôle du mouvement de la plaque. Une vibration parasite de la plaque peut influencer le seuil différentiel que nous avons mesuré dans les expériences, surtout dans l'expérience 2. Au moment de définir quel stimulus entre une plaque plate et une forme avec une très petite courbure est plus convexe, les sujets utiliseront peut-être cette vibration comme un indice perturbant au lieu de la pente et de la hauteur perçue. En conséquence, la stabilité de la plaque doit être aussi grande que possible.

Pendant les expériences, nous avons employé une méthode expérimentale dite "deux alternatives à choix forcé avec le stimulus constant" pour limiter ces indices non géométriques et indésirables tels que les vibrations, les instabilités de contrôle, les stick-slips, les artefacts mécaniques, etc.

3.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la conception du dispositif à retour de forme. Une série d'expériences ont été effectuées pour évaluer le dispositif conçu et les modèles du mouvement de la plaque proposés au chapitre 2.

Dans une première partie, après avoir déterminé et spécifié le cahier des charges, nous avons présentés la réalisation du dispositif. Ce dispositif peut faire pivoter, élever et translater une plaque plane en sorte que cette plaque soit toujours tangente à une forme virtuelle au point de contact lors de l'exploration manuelle. Il est composé de quatre parties : une plaque plane comme interface homme-machine à explorer pendant la perception de la forme ; un capteur de force pour mesurer la force et le couple appliqués par le doigt au point de contact et ensuite, à partir des valeurs, calculer la position du doigt ; deux *Novint Falcons* pour orienter, élever et translater la plaque ; et un ordinateur de bureau pour contrôler les mouvements des deux *Falcons* et calculer la position du doigt. Ensuite, nous avons présenté la loi de commande qui contrôle le système. L'estimation de la position du doigt à partir d'un capteur de force a été expliquée précisément.

Dans une deuxième partie, nous avons effectué quatre expériences. L'expérience 1 est la première évaluation de la performance du dispositif. Les résultats montrent que le dispositif est capable de produire plusieurs formes virtuelles distinctes. L'expérience 2 a mesuré la courbe à peine perceptible pour une référence plate. Le seuil différentiel moyen est proche de celui qu'on peut trouver dans des conditions semblables dans la littérature. L'expérience 3 a comparé les performances des trois modèles du mouvement en mesurant les seuils différentiels. Les résultats indiquent que le modèle de mouvement avec compensation de la position est le meilleur, celui

pour lequel la fraction de Weber est très proche de celle de la condition réelle. L'expérience 4 a mesuré le biais de perception en utilisant une forme réelle comme l'échantillon étalon et les formes virtuelles comme échantillons de comparaison. Les résultats manifestent que le dispositif employant le modèle du mouvement avec compensation de la position peut afficher une forme virtuelle qui est vraiment perçue comme étant courbée.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous attacher au couplage tactile-kinesthésique. Nous allons d'abord concevoir une interface tactile pour rendre les textures fines, et ensuite l'intégrer sur cette plateforme kinesthésique. Nous aurons donc un dispositif qui permet de coupler les sensations kinesthésique et tactile.

Chapitre 4

Couplage kinesthésique et tactile

Sommaire

4.1	Introduction	88
4.2	Principe et contexte de la simulation de texture fine	88
4.2.1	La psychophysique de la rugosité	88
4.2.2	Comment obtenir des illusions de surfaces texturées?	90
4.2.3	Stimulation vibrotactile et effet “squeeze film”	90
4.2.4	Travail de Biet et al.	91
4.2.5	Simulation de texture fine par la transformation spatio-temporelle	93
4.3	Conception et contrôle du dispositif couplé kinesthésique et tactile	94
4.3.1	Conception du dispositif de couplage tactile-kinesthésique	95
4.3.2	Contrôle du dispositif de couplage tactile-kinesthésique	96
4.4	Couplage kinesthésique et tactile pour simuler des textures larges	97
4.4.1	Principe de la restitution de texture large à profil d’ondulation	98
4.4.2	Modélisation de la texture large couplée kinesthésique et tactile	98
4.4.3	Mise en œuvre expérimentale	101
4.4.3.1	Expérience 1 : correspondance entre les textures larges simulées et réelles	101
4.4.3.2	Expérience 2 : comparaison des deux modèles avec la condition réelle à l’aide du JNDs	106
4.4.3.3	Discussion générale	108
4.5	Conclusion du chapitre	110

4.1 Introduction

Aux chapitres précédents, nous nous sommes focalisés sur le retour de forme qui est assuré par un positionnement adéquate de l'effecteur, et pour lequel nous avons conçu un dispositif kinesthésique. Il s'agit maintenant de nous intéresser au couplage tactile-kinesthésique. Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter le retour tactile pour la simulation de textures fines. Ensuite, nous allons concevoir une plaque tactile basée sur les travaux de Biet et al. Le dispositif kinesthésique et la plaque tactile sont ensuite intégrés dans un dispositif qui permet de coupler les sensations kinesthésique et tactile. Nous allons utiliser ce dispositif pour simuler des textures larges à profil sinusoïdal. Deux modèles de textures larges sont proposés : l'un par l'effet kinesthésique seul et l'autre par l'effet kinesthésique et tactile. Finalement, nous effectuons des expériences afin d'évaluer le dispositif conçu et de comparer les modèles de restitution de texture large.

4.2 Principe et contexte de la simulation de texture fine

Le rendu de texture a récemment reçu une attention croissante dans le domaine haptique. Des textures haptiques appropriées, superposées sur des objets virtuels, peuvent en améliorer le réalisme, puisque des objets haptiques rendus sans textures se perçoivent généralement comme doux et glissants.

4.2.1 La psychophysique de la rugosité

La texture concerne une propriété de la surface correspondant généralement à un motif géométrique, périodique ou non, de faible dimension. Elle est identifiable soit visuellement, soit tactilement. Sa dimension esthétique peut donner des indices sur le comportement mécanique des objets, par exemple, la texture peut contribuer, à la dextérité de saisie lors de la manipulation ou au contraire favoriser un glissement relatif.

De nombreux secteurs d'activité souhaiteraient bénéficier d'une amélioration des connaissances sur les mécanismes du toucher de textures pour améliorer la performance de leurs produits ou services. Dans la médecine, une maîtrise des mécanismes du toucher de texture peut aider à la définition des diagnostics ou à proposer des solutions de substitution. On peut aussi envisager un apport pour les simulateurs médicaux de palpation en dermatologie ou encore la téléopération. En réalité virtuelle, où les environnements synthétiques générés par la machine doivent se comporter de manière tangible, la disponibilité de cette dimension sensorielle est un pré requis indispensable à l'immersion et à la performance.

Des études de positionnement multidimensionnel entre surfaces texturées ont révélé que, parmi les perceptions relatives à la distribution des éléments sur une surface, la rugosité est l'attribut le plus important [HBKY00]. Aussi, en psychophysique, il est généralement d'utiliser

le mot “texture” de manière interchangeable avec l’expression “rugosité de surface”.

a. L’échelle spatiale de la texture

Nous pouvons classer les textures en trois catégories en fonction de l’échelle spatiale. Pour des textures assez grossières (espacement supérieur à 2 ou 3mm), il est en général admis que la rugosité est perçue grâce à un code spatial déterministe. Dans [CJ92], Connor et al. ont montré que la rugosité perçue est corrélée positivement avec l’augmentation de distance entre motifs (hypothèse spatiale dans l’expérience psychophysique). Pour des textures très fines dont l’inter-espacement entre motifs ou rainures est inférieur à $200\mu m$, c’est l’information vibratoire qui est utilisée pour les percevoir. Dans [BH03], en utilisant un transducteur à effet Hall fixé sur l’arrière de la pulpe du doigt, Bensmaïa et Hollins ont mis en évidence la présence de vibrations sur la peau en relation avec la période spatiale de la texture. Pour les textures à l’échelle intermédiaire (compris entre 2 mm et $200\mu m$), [YGD+01] a trouvé que le code de rugosité reposerait sur des formes stochastiques (aléatoires mais corrélées au relief de texture) du code spatial.

b. L’angle d’incidence du doigt sur la texture

Quand on touche la surface d’un objet afin d’en percevoir la texture, on contrôle généralement la force appliquée normalement à la surface et la vitesse du doigt tangentiellement. En fait, le contrôle de l’angle entre le doigt et la surface est également important, car cela fait varier l’aire de contact et l’impédance mécanique du bout du doigt. Martinot et al. [Mar06] ont utilisé un vibromètre laser ainsi qu’un accéléromètre pour analyser le mouvement de la pulpe du doigt et de la phalange distale quand la peau est compressée contre une roue crantée en rotation. Ils constatent que plus l’angle d’incidence augmente, plus les vibrations sur l’ongle sont présentes. Ils remarquent en particulier une augmentation très significative de l’intensité vibratoire pour des angles d’incidences compris entre 45 et 60 degrés.

c. L’emboîtement spatial entre la texture fine et l’empreinte digitale

L’orientation du mouvement du doigt sur la surface explorée influence largement l’emboîtement spatial entre la texture et l’empreinte digitale, surtout pour les textures fines dont les aspérités sont de même ordre de grandeur en taille que celles des crêtes épidermiques. Cet emboîtement joue un rôle important dans la perception de la rugosité. Dans [Mar06], Martinot et al. ont examiné les différences de rugosité en fonction de l’orientation de textures rugueuses par rapport aux lignes de l’empreinte digitale. Les stimuli étaient des textures crantées qui étaient présentés dans

quatre configurations différentes, avec leurs motifs reposant parallèlement, perpendiculairement ou encore diagonalement (-45° et 45°) par rapport à l'axe du doigt. La tâche était d'exprimer l'intensité de la rugosité perçue. Les résultats montrent que, quand les crêtes des textures sont parallèles à celles de l'empreinte, on a la meilleure intensité de la rugosité perçue.

4.2.2 Comment obtenir des illusions de surfaces texturées ?

Des recherches en psychophysique et en neurophysiologie du toucher ont été dédiées à rechercher les déterminants majeurs de la rugosité perçue avec un doigt nu. Dans [LT72], Lederman et Taylor ont trouvé, par une série d'expériences, que la perception de la rugosité était corrélée fortement et positivement avec la largeur des vallées entre les rainures de tablettes métalliques. L'augmentation de la largeur des crêtes avait un effet beaucoup moins important, tendant à diminuer la rugosité perçue. Connor et Johnson [CJ92] ont trouvé que la rugosité perçue est corrélée positivement avec l'augmentation de distance entre motifs, hypothèse spatiale dans l'expérience psychophysique. Dans [CS01], Cascio et Sathuian ont argumenté que le codage temporel joue un rôle important dans la perception de la rugosité. Pour des discriminations entre textures où la largeur de cran varie, la fréquence vibratoire serait le principal déterminant de la discrimination. La vibration est également essentielle à la perception de texture, et plus particulièrement de sa rugosité, lors des situations d'exploration en contact direct avec la main.

A partir de la connaissance des déterminants majeurs de la rugosité, de nombreux dispositifs tactiles ont émergé, qui tentent de simuler le toucher d'une texture. Ils peuvent afficher la texture par indentation normale de la peau ou bien par vibrations localisées à l'aide d'une matrice de picots [WPF⁺05] [FEB06] [KSKK04]. Cependant, ce genre de dispositif tactile rencontre encore bien souvent des problèmes de miniaturisation et d'intégration, qui rendent délicats la simulation de textures fines. La miniaturisation va inévitablement atteindre ses limites et l'intégration de matrice de picots va imposer des contraintes technologiques et économiques. Une autre possibilité consiste à créer des sensations tactiles en déformant la peau latéralement, avec déviation négligeable dans le sens vertical, permettant la miniaturisation [WH06] [THC05] [Wie11]. Une autre voie récente consiste à créer un frottement variable et contrôlé en fonction de la position du doigt pour simuler une texture [WGCP07] [BGLS07] [KTM07] [BPIH10]. Ce genre de dispositifs utilise généralement une surface continue comme interface à explorer. Parmi ces dispositifs, la création de l'effet de squeeze film est une technique particulière pour produire un frottement variable entre le doigt et la surface.

4.2.3 Stimulation vibrotactile et effet “squeeze film”

Dans [WF95], Watanabe et al. ont proposé une méthode permettant de contrôler la sensation tactile de rugosité de surface en utilisant une stimulation vibrotactile à haute fréquence. Cette

méthode crée un sentiment de glissement sur une surface en appliquant des vibrations ultrasoniques, avec une amplitude de quelques micromètres, à la surface.

Pour générer des vibrations ultrasoniques, les auteurs ont conçu un dispositif constitué d'une poutre en acier dont chacune des extrémités est fixée à un transducteur de Langevin vibrant à la fréquence de $77kHz$. Ces actionneurs peuvent induire des vibrations mécaniques maximales d'environ $2\mu m$ d'amplitude à la poutre. Cette stimulation vibrotactile n'est pas directement perçue par l'utilisateur, car elle est en dehors de la bande passante des mécanorécepteurs. Mais lorsqu'un utilisateur déplace son doigt sur cette poutre en vibration, il constate que la poutre devient glissante et très douce en comparaison avec la poutre au repos. Cela permet de passer d'un état rugueux à un état glissant. Cette méthode ouvre donc la voie à un nouveau type de stimulateurs tactiles, aptes à stimuler un état de surface variable de manière continue.

Les vibrations que le dispositif produit, engendrent un sentiment de glissement, du à l'effet de "squeeze film" entre le doigt et la surface. L'effet "squeeze film" est un phénomène de lubrification sans contact qui relève de la dynamique des fluides. Lorsqu'une des deux surfaces en contact vibre très rapidement, il est possible de créer un coussin d'air par les vibrations normales. Ce coussin d'air est compressible et subit des cycles de compression et décompression engendrés par la variation de volume. Si la surface vibrante est actionnée de manière sinusoïdale, l'épaisseur du coussin d'air variera aussi de manière sinusoïdale. Quand le coussin d'air est comprimé, il se crée dans l'espace séparant les deux surfaces une surpression par rapport à l'environnement extérieur. La surpression permet d'induire une variation du coefficient de frottement entre les deux surfaces.

De la même manière, lorsqu'on touche une plaque vibrant à haut fréquence, un coussin d'air se crée entre la surface du bout du doigt et la surface de la plaque. La compression et la décompression du coussin d'air va induire une variation du coefficient de frottement entre le doigt et la plaque.

4.2.4 Travail de Biet et al.

Biet et al. [Bie06] ont conçu une plaque tactile ultrasonique utilisant l'effet squeeze film. La plaque tactile est actionnée par les céramiques piézoélectriques qui sont collées sur un résonateur (substrat) fait de cuivre béryllium. Ils ont aussi calculé la surpression entre le doigt et la plaque causée par l'effet squeeze film, en prenant en compte les propriétés géométriques des empreintes digitales (ou crêtes épidermiques) car on ne peut pas supposer que les ondulations des empreintes digitales sont négligeables par rapport à la rugosité de la plaque vibrante (quelques micromètres), voir la figure 4.1. L'épaisseur du film d'air à un instant donné et le profil spatial de la pression moyenne temporelle sous le doigt sont illustrées dans la figure 4.2.

Dans la figure 4.2, les pics de pression sont localisés là où la peau du doigt est aussi proche que

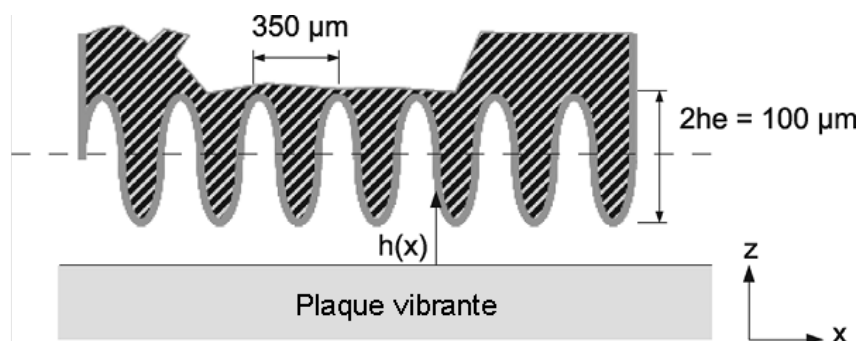


FIGURE 4.1 – Profil approximatif d’un doigt quand les crêtes épidermiques sont prises en compte (d’après [Bie06]).

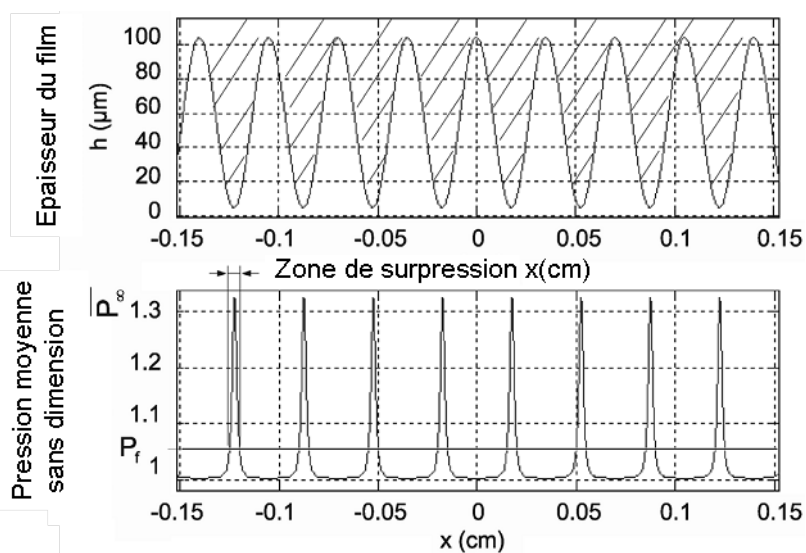


FIGURE 4.2 – L’épaisseur du film d’air à un instant donné et profil spatial de la pression moyenne temporelle sous le doigt (d’après [Bie06]).

possible de la plaque vibrante, c'est à dire, aux endroits des crêtes d'empreintes digitales, tandis qu'aux rainures d'empreintes digitales, la pression est similaire à la pression atmosphérique. Alors, ces petites zones de surpression peuvent donner lieu à un changement de coefficient de frottement relatif entre le doigt et la surface de la plaque, qui peut se calculer par l'équation suivante [Bie06] :

$$\frac{\mu'}{\mu} = 1 - \frac{F_s}{F_f} \quad (4.1)$$

avec F_s la force moyenne exercée par l'effet squeeze film sur le doigt et F_f la force normale de contact appliquée par le doigt.

A partir de la surpression et du coefficient de frottement relatif, il est possible de prévoir l'amplitude des vibrations nécessaires pour diminuer le coefficient de frottement entre la surface et le doigt d'une façon significative afin de permettre à l'utilisateur de percevoir la différence frottant-glissant. Ces analyses donnent ainsi les informations nécessaires à la conception de la plaque tactile. Par ailleurs, plutôt que de faire vibrer la dalle tactile uniformément, Biet et al. utilisent plutôt une onde de flexion, plus facile à réaliser. Le dispositif ainsi réalisé est présenté à la figure 1.7b, et une image de la vibration produite, mesurée en utilisant un vibromètre LASER, est présentée dans la figure 4.3. Les résultats montrent qu'une amplitude de vibration d'environ $2.3\mu\text{m}$ crête-crête est obtenue.

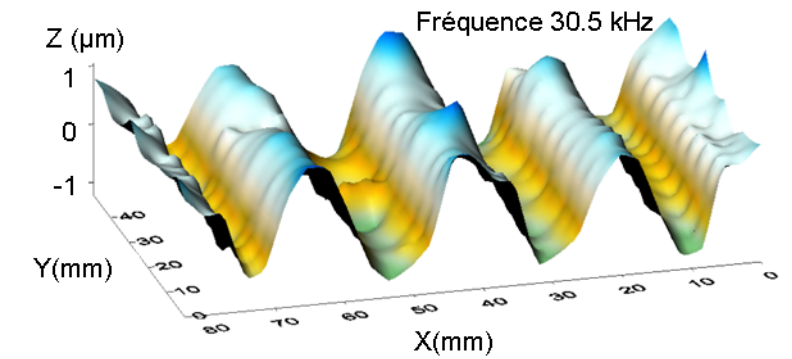


FIGURE 4.3 – L'amplitude de vibration mesurée par le vibromètre LASER (d'après [Bie06]).

4.2.5 Simulation de texture fine par la transformation spatio-temporelle

Pour simuler des surfaces de rugosité paramétrables, il faut prendre en compte l'aspect spatio-temporel de création des stimuli [Bie06]. C'est la modulation de l'amplitude de vibration, rendant certaines zones plus ou moins glissantes, qui va créer l'illusion de toucher des surfaces crantées et rugueuses. La figure 4.4 montre le principe de modulation d'une surface crantée et rugueuse par la transformation spatio-temporelle.

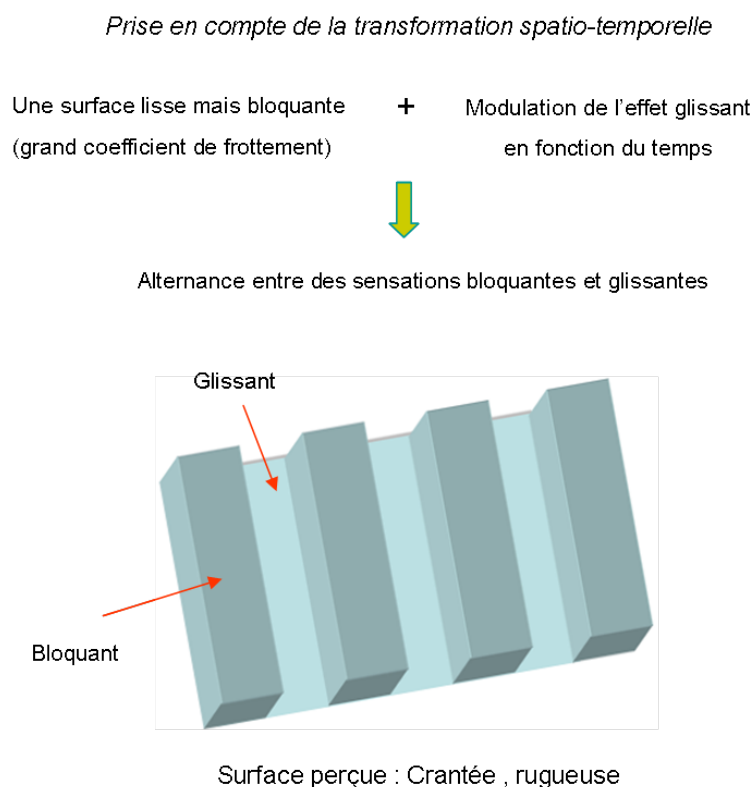


FIGURE 4.4 – Principe de modulation d’une surface crantée et rugueuse par la transformation spatio-temporelle.

La référence pour l’amplitude de la vibration est synchronisée sur la position du doigt. Une transformation spatio-temporelle permet de contrôler les instants d’apparition des zones glissantes en fonction de cette position. Ainsi, la mesure de la position du doigt sur la plaque est un élément important de la simulation de texture. Par ailleurs, signalons que bien que la stimulation soit globale et a priori uniforme sur l’ensemble de la zone du doigt en contact avec la surface vibrante, elle permet de simuler des textures fines dont la période spatiale est bien inférieure aux dimensions de cette zone de contact.

4.3 Conception et contrôle du dispositif couplé kinesthésique et tactile

A partir des travaux de Biet et al., nous avons conçu une autre plaque tactile utilisant l’effet de squeeze film, et dont le capteur servant à mesurer la position du doigt est celui-là même utilisé pour la restitution de forme. Pour prendre en compte l’aspect spatio-temporel de création des stimuli, le stimulateur doit donc imposer une stimulation cohérente vis-à-vis de la texture simulée et des déplacements instantanés du doigt. Biet et al utilisaient un capteur linéaire à 1 degré de

liberté pour mesurer à tout instant la position du doigt. La connexion entre le capteur et le doigt de l'utilisateur était réalisée au moyen d'une bague réglable. Cet assemblage du capteur de position n'était pas transparent. En ce qui nous concerne, c'est donc un capteur de force/couple disposé en dessous de la plaque tactile qui est utilisé pour en déduire, par calcul, la position du doigt.

Puis, nous avons couplé cette plaque tactile avec le dispositif à restitution de forme. De ce fait, nous avons obtenu un dispositif couplé kinesthésique et tactile qui peut reproduire simultanément la forme et la texture.

4.3.1 Conception du dispositif de couplage tactile-kinesthésique

La plaque tactile conçue est présentée sur la figure 4.5. Elle se compose essentiellement de deux parties : le résonateur mécanique (la surface d'exploration) et la matrice des céramiques piézoélectriques. Son dimensionnement diffère peu de la plaque de Biet et al.

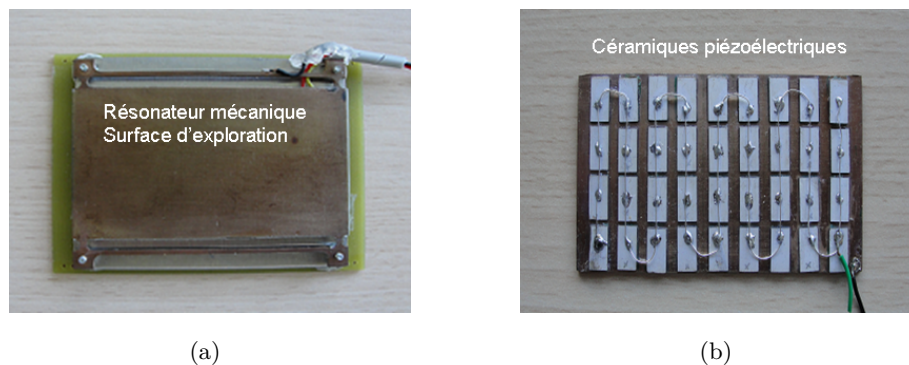


FIGURE 4.5 – Vue de dessus et de dessous de la plaque tactile. a) Le résonateur mécanique; b) Les céramiques piézoélectriques.

Cette plaque remplace la plaque plane dans le dispositif à restitution de forme. Avec la plaque tactile, nous obtenons un dispositif qui peut reproduire simultanément la sensation de forme et la sensation de la texture. La figure 4.6 illustre comment coupler le dispositif à retour de forme et la plaque tactile. La plaque plane en plastique qui avait servi d'interface lors de la restitution de formes est remplacée par la plaque tactile placée au-dessus du capteur de force. Pour ne pas endommager les céramiques et pouvoir bien connecter la plaque tactile et le capteur de force, une plaque en plastique fine est installée entre les deux dernières.

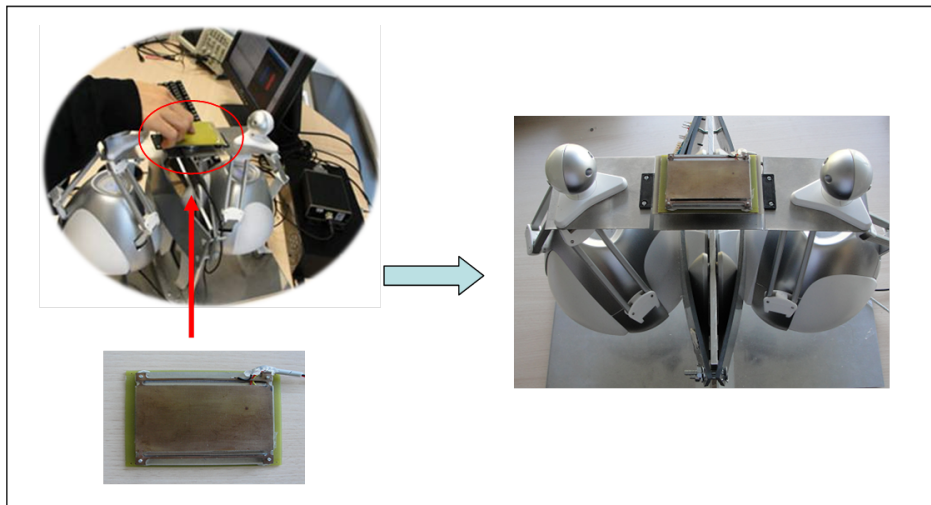


FIGURE 4.6 – Couplage de la plaque tactile et du dispositif à retour de forme.

4.3.2 Contrôle du dispositif de couplage tactile-kinesthésique

En ce qui concerne le contrôle du système, c'est la position du doigt qui est la liaison entre le retour kinesthésique et le retour tactile. Pour le retour de forme, comme dans le chapitre 3, à partir de la position du doigt et en se référant à la forme à reproduire, on contrôle la plateforme qui oriente, élève et déplace la plaque tactile. Du côté du retour de texture, à partir de la position du doigt, et en se référant à la texture à reproduire, on module l'amplitude vibratoire de la plaque tactile. Le principe du contrôle du système est montré à la figure 4.7.

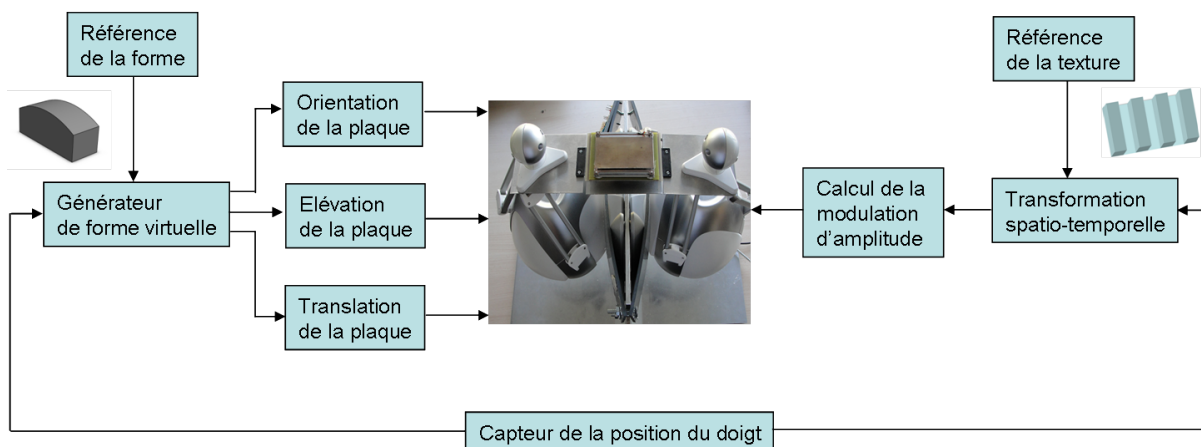


FIGURE 4.7 – Le principe du contrôle du système couplé kinesthésique et tactile. Il synthétise le contrôle de la plaque tactile à retour de forme et le contrôle de la plaque tactile à retour de texture.

Selon l'interprétation avec le concept de HIL énoncé au chapitre 3, nous pouvons donc maintenant compléter le contrôle de la voie tangentielle : ici la force tangentielle restituée par

le stimulateur est effectivement contrôlée en fonction de la position du doigt et d'une texture de référence. Plus précisément, c'est le coefficient de friction μ qui est commandé, la force F_t étant alors fonction de μ et de la force normale, selon la loi de Coulomb. La figure 4.8 résume ces interactions.

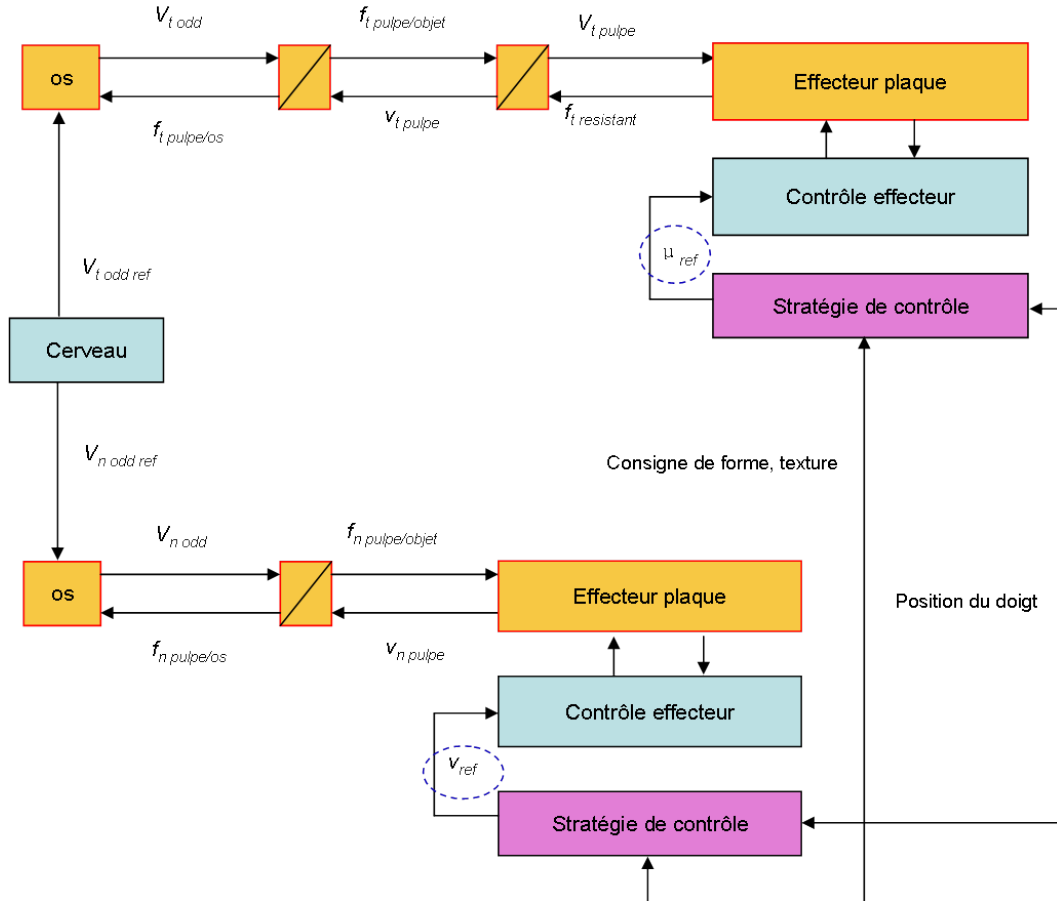


FIGURE 4.8 – Représentation des contrôles simultanés de la plate-forme et de la plaque pour la reconstitution de forme et de texture

4.4 Couplage kinesthésique et tactile pour simuler des textures larges

Nous allons présenter dans cette partie la reproduction de texture large à profil d'ondulation, dont l'ordre de grandeur des aspérités est de l'ordre du millimètre de hauteur et de quelques dizaines de millimètres de période, à l'aide du dispositif couplé kinesthésique et tactile. Deux modèles de rendu des textures larges sont proposés. A la fin, des expériences sont également effectuées afin d'évaluer le dispositif mais aussi pour comparer les deux modèles.

4.4.1 Principe de la restitution de texture large à profil d'ondulation

Les dispositifs employant la stimulation vibrotactile à haute fréquence simulent principalement des textures très fines, d'une hauteur micrométrique. Quant aux textures larges, par exemple des textures périodiques sinusoïdales de hauteur millimétrique, on peut les simuler en utilisant des dispositifs à retour de force, tel le *PHANTOM*. Pour ce faire, il faut une conception appropriée du rendu de texture, le contrôle stable d'une interface haptique, et une bonne compréhension du système somato-sensoriel [CT04].

Le rendu de texture large par le dispositif à retour de force comprend généralement trois phases de processus. La première phase est le calcul de la profondeur de pénétration et la force résultante. Si l'outil d'interaction pénètre la surface d'un objet virtuel, une force d'intervention est calculée et envoyée à l'interface pour créer l'effet haptique prévu. La deuxième phase est la restitution de la force à l'utilisateur humain. La troisième phase est la perception de la force par l'utilisateur. L'utilisateur ressent les stimuli mécaniques générés par l'interface haptique, en extrait les informations de variation de force, forme une perception de l'objet virtuel rendu, et détermine si l'objet virtuel est réaliste.

Nous proposons dans cette étude une nouvelle approche utilisant une interface continue. La plaque tactile du dispositif conçu couplé kinesthésique et tactile est l'interface explorée au cours du rendu de texture large.

4.4.2 Modélisation de la texture large couplée kinesthésique et tactile

Pour la modélisation de texture large, nous utilisons un motif sinusoïdal 1D superposé à une surface plane. Des motifs sinusoïdaux ont été largement utilisés comme éléments de base pour les surfaces texturées dans les études sur la perception haptique et comme une fonction de base fixée pour la modélisation de textures réelles [CT04] [TAN⁺05].

a. Modèle de rendu de textures larges par l'effet kinesthésique seul

La figure 4.9 illustre le modèle de rendu de texture large. La texture large à profil d'ondulation est représentée par :

$$Z(x) = A \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{x}{L}\right) \quad (4.2)$$

où A et L sont l'amplitude et la longueur d'onde du motif sinusoïdal.

Pour obtenir la sensation sinusoïdale au cours de l'exploration de la plaque tactile par un mouvement d'avant en arrière du doigt, nous contrôlons l'orientation de la plaque de manière sinusoïdale en sorte que cette plaque tactile soit toujours tangente au profil de la texture large au

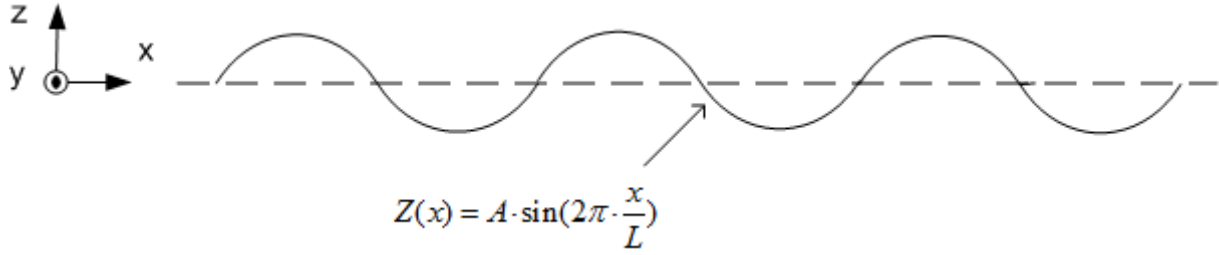


FIGURE 4.9 – Illustration du modèle de rendu de texture large par l'effet kinesthésique seul.

point de contact. Le principe est similaire à celui décrit pour la perception de forme du chapitre 2. La dérivation de l'Eq. 4.2 sur x est la pente. Nous obtenons :

$$\tan \theta = A \cdot \frac{2\pi}{L} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{x}{L}\right) \quad (4.3)$$

Finalement, l'angle dont il faut orienter la plaque au point de contact s'écrit :

$$\theta = \arctan \left[A \cdot \frac{2\pi}{L} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{x}{L}\right) \right] \quad (4.4)$$

Cette équation traduit un modèle de rendu de la texture large par la perception de courbure, seul l'effet kinesthésique intervient. Pour accentuer l'effet, nous proposons le modèle suivant, qui est couplé kinesthésique et tactile.

b. Modèle de rendu de textures larges par le couplage des effets kinesthésique et tactile

Lorsqu'on explore une texture large d'un ordre de grandeur des aspérités de quelque dizaines de millimètres de période selon la longueur, la force du doigt est plus importante sur une partie de la courbure sinusoïdale (Figure 4.10a), représentant la "montée" et nous faisons alors l'hypothèse que l'utilisateur perçoit les motifs fins sur la surface. Au contraire, pour le côté représentant la "descente", la force est plus faible (Figure 4.10b) et l'utilisateur va moins bien percevoir les motifs ou peut ne pas les percevoir.

Afin de reproduire les motifs fins, nous ajoutons donc l'effet tactile sur le côté en face au doigt (montée) dans le modèle de rendu de texture large par l'effet kinesthésique seul. Pour plus de simplicité, nous modélisons les motifs en passant d'un état rugueux à un état glissant, selon la description donnée à la figure 4.11. Les motifs sont rendus par la plaque tactile en contrôlant les effets bloquant et glissant en fonction du mouvement de l'utilisateur.

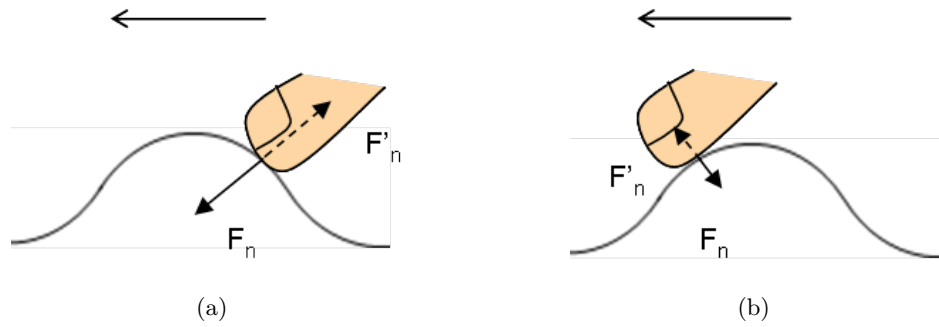


FIGURE 4.10 – Illustration du contact et de la force entre le doigt et la texture large. a). Le côté “monrée” ; b). Le côté “descente”.

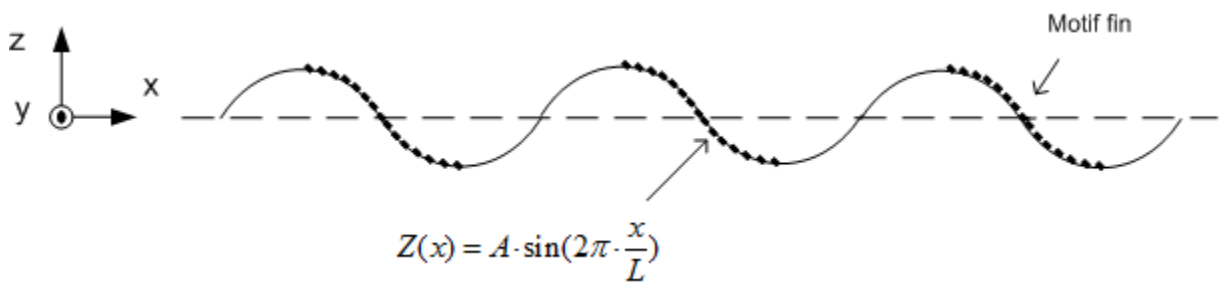


FIGURE 4.11 – Illustration du modèle de rendu de texture large par l’effet couplé kinesthésique et tactile.

4.4.3 Mise en œuvre expérimentale

Dans cette partie, nous mettons en œuvre les tests pour évaluer le dispositif couplé kinesthésique et tactile. Cette évaluation des performances du dispositif est dans le cadre de la simulation de texture large en utilisant l'effet kinesthésique seul, puis couplé à l'effet tactile. Deux séries d'expériences sont donc effectuées. La première est d'examiner si les textures larges générées par le dispositif correspondent, au niveau de l'amplitude et de la période spatiale, à des textures larges réelles. La deuxième est de discriminer les textures larges simulées et réelles en mesurant le seuil différentiel de perception.

4.4.3.1 Expérience 1 : correspondance entre les textures larges simulées et réelles

Nous rangeons les textures larges simulées et réelles en deux catégories : celles dont l'amplitude varie à période fixe et celles dont la période varie à amplitude fixe. Et nous simulons chaque catégorie de textures larges de deux manières : par effet kinesthésique puis par effet couplé kinesthésique et tactile. Nous avons donc quatre conditions virtuelles au total.

Pour chaque condition, nous comparons quatre textures larges virtuelles générées par le dispositif avec six textures larges réelles dont :

- quatre ont la même amplitude ou la même période respectivement,
- l'une possède une amplitude ou une période inférieure à la plus petite amplitude ou période des textures larges virtuelles,
- la dernière possède une amplitude ou une période supérieure à la plus grande amplitude ou période des textures larges virtuelles.

Cela est pour prendre en compte l'effet marginal. Pour chaque texture large virtuelle, on demande aux sujets de découvrir la texture large simulée parmi les textures larges réelles.

a. Les sujets

Dix sujets volontaires (huit hommes et deux femmes) participent à cette expérience. Ils n'ont pas de callosités, de tissu cicatriciel, ou d'autres signes des dommages à la peau de leurs doigts et tous sont droitiers. Aucun des sujets n'avaient déjà participé à une étude similaire.

b. Stimuli

Les stimuli virtuels sont générés par le dispositif couplé kinesthésique et tactile en employant les deux modèles de textures larges correspondant aux figures 4.9 et 4.11. Quatre séries d'échan-

tillons virtuels sont simulées : la série générée par l'effet kinesthésique seul dont les amplitudes sont de $0.4mm$, $0.6mm$, $0.8mm$ et $1.0mm$ respectivement pour lesquelles la période est fixée à $20mm$; la série générée par l'effet couplé kinesthésique et tactile dont les amplitudes et les périodes sont les mêmes que la série précédente ; la série générée par l'effet kinesthésique seul dont les périodes sont de $18mm$, $20mm$, $22mm$ et $24mm$ respectivement pour lesquelles les amplitudes sont fixées à $1mm$; et la série générée par l'effet couplé kinesthésique et tactile dont les périodes et les amplitudes sont les mêmes que la série précédente.

Les stimuli réels sont des textures larges à profil sinusoïdal en PVC plastique. Il y a deux séries d'échantillons réels : la série avec l'amplitude variable et la période fixe dont les amplitudes sont de $0.2mm$, $0.4mm$, $0.6mm$, $0.8mm$, $1.0mm$ et $1.2mm$ respectivement et toutes les périodes sont fixées à $20mm$; la série avec la période variable et l'amplitude fixe dont les périodes sont de $16mm$, $18mm$, $20mm$, $22mm$, $24mm$ et $26mm$ respectivement et toutes les amplitudes sont fixées à $1mm$.

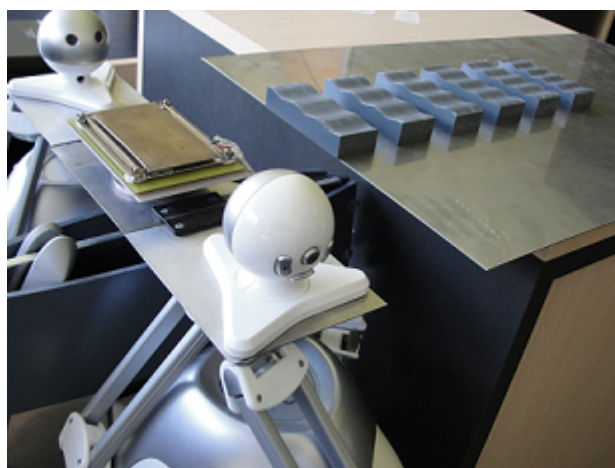


FIGURE 4.12 – Stimuli pour l'expérience 1. La série d'échantillons réels présentés a la même amplitude et différentes périodes. L'autre série d'échantillons réels avec amplitude variable et période fixe n'est pas présentée ici.

c. Protocole expérimental

Avant de procéder à l'expérience, les sujets se lavent et se sèchent les mains, avec une attention particulière à l'extrémité des doigts. Pendant l'expérience, les sujets ne peuvent pas regarder le dispositif et les échantillons réels. Ils portent un casque d'écoute afin d'éviter l'interférence de bruit provoqué par la vibration à haute fréquence de la plaque tactile.

A chaque sujet nous demandons de mettre son doigt préféré sur la plaque tactile et de le déplacer le long de la surface de la plaque pour découvrir la texture large simulée. On demande

au sujet d'essayer de maintenir un angle au contact d'environ 45 degrés entre la plaque et sa phalange distale. Nous lui demandons d'employer une "force légère et une vitesse moyenne de $0.1m/s$ ". Les sujets sont libres de passer autant de temps qu'ils le désirent pendant l'exploration.

Après avoir découvert la texture large virtuelle, le sujet explore les échantillons réels pour comparer la texture large simulée avec les six textures larges réelles. Lorsque tous les échantillons réels sont explorés, le sujet doit alors décider quelle texture large réelle ressemble le plus à la texture large virtuelle qui vient de lui être présentée.

Afin d'améliorer la procédure de reconnaissance des textures larges, les échantillons réels sont aléatoirement présentés avant le test et les échantillons virtuels sont simulés de manière aléatoire pendant le test. Comme il existe quatre conditions, le processus ci-dessus se répète quatre fois correspondant à chaque série de textures larges simulées.

Le test commence par un essai d'entraînement qui a pour but de familiariser le sujet avec les stimuli et la tâche demandée. Les réponses sont données pendant l'entraînement, par contre aucune correction n'est donnée pendant le test.

d. Résultats

Le tableau 4. 1 présente les pourcentages de réponses en correspondance selon l'amplitude pour les textures larges simulées par l'effet kinesthésique seul. A partir de ces résultats, nous pouvons conclure que les sujets sont capables de distinguer clairement les texture larges simulées avec les amplitudes de $0.4mm$ et $0.6mm$ (les pourcentages de réponses correctes sont de 70% et 60% respectivement). Pour des amplitudes plus grandes, la correspondance entre les textures larges simulées et réelles paraît nettement moins claire (40% et 30%). Pour toutes les textures larges simulées, parmi les réponses incorrectes, les sujets ont généralement choisi des textures larges réelles avec des amplitudes plus petites, ce que montrent les zones en gris.

Le tableau 4. 2 présente les pourcentages des réponses de correspondance selon l'amplitude lorsque les textures larges simulées sont générées par l'effet kinesthésique et tactile. A partir des résultats, nous remarquons que, en ajoutant l'effet tactile, la correspondance entre les textures larges simulées et réelles est meilleure (les pourcentages corrects sont augmentés à 70%, 70%, 60% et 50% respectivement).

Le tableau 4. 3 présente les pourcentages des réponses de correspondance selon la période pour des textures larges simulées générées par l'effet kinesthésique seul. Pour les textures larges simulées avec de grandes périodes, les sujets sont capables de les distinguer clairement (70% pour celle de $24mm$; 50% pour celle de $22mm$). Pour les textures larges simulées avec de plus petites périodes, la distinction est moins claire (40% pour celle de $20mm$; 30% pour celle de $18mm$). Pour toutes les textures larges simulées, parmi les réponses incorrectes, les sujets ont

TABLE 4.1 – Pourcentage des réponses de correspondance selon l’amplitude. Les textures larges simulées sont générées par l’effet kinesthésique seul.

Amplitude de la texture large simulée	Amplitude de la texture large réelle (la période est de 20mm)					
	0.2mm	0.4mm	0.6mm	0.8mm	1.0mm	1.2mm
0.4mm	30%	70%	--	--	--	--
0.6mm	--	30%	60%	10%	--	--
0.8mm	--	20%	40%	40%	--	--
1.0mm	--	10%	10%	40%	30%	10%

TABLE 4.2 – Pourcentage des réponses de correspondance selon l’amplitude. Les textures larges simulées sont générées par l’effet kinesthésique et tactile.

Amplitude de la texture large simulée	Amplitude de la texture large réelle (la période est de 20mm)					
	0.2mm	0.4mm	0.6mm	0.8mm	1.0mm	1.2mm
0.4mm	20%	70%	10%	--	--	--
0.6mm	--	20%	70%	10%	--	--
0.8mm	--	10%	20%	60%	10%	--
1.0mm	--	10%	--	30%	50%	10%

TABLE 4.3 – Pourcentage des réponses de correspondance selon la période. Les textures larges simulées sont générées par l’effet kinesthésique seul.

Période de la texture large simulée	Période de la texture large réelle (l’amplitude est de 1mm)					
	16mm	18mm	20mm	22mm	24mm	26mm
18mm	10%	30%	40%	20%	--	--
20mm	--	--	40%	40%	10%	10%
22mm	--	--	10%	50%	30%	10%
24mm	--	--	--	--	70%	30%

TABLE 4.4 – Pourcentage des réponses de correspondance selon la période. Les textures larges simulées sont générées par l'effet kinesthésique et tactile.

Période de la texture large simulée	Période de la texture large réelle (l'amplitude est de 1mm)					
	16mm	18mm	20mm	22mm	24mm	26mm
18mm	10%	40%	40%	10%	--	--
20mm	--	10%	60%	20%	10%	--
22mm	--	10%	--	70%	20%	--
24mm	--	--	--	10%	80%	10%

généralement choisi des textures larges réelles avec les périodes plus grandes. Par ailleurs, on peut remarquer que, pour l'échantillon avec l'amplitude de $1.0mm$ et la période de $20mm$, la correspondance (50%) est différente de celle obtenue pour le même échantillon dans le tableau 4. 1 (30%). Ceci s'explique par des conditions expérimentales différentes : dans un cas, les autres échantillons sont d'amplitude variable ; dans l'autre cas, les autres échantillons sont de période variable.

Enfin, le tableau 4. 4 présente les pourcentages des réponses de correspondance selon la période des textures larges simulées générées par l'effet kinesthésique et tactile. En ajoutant l'effet tactile, la correspondance entre les textures larges simulées et réelles est meilleure (les pourcentages corrects sont augmentés à 40%, 60%, 70% et 80% respectivement).

e. Discussion

L'expérience 1 est une première évaluation qui nous montre que le dispositif couplé kinesthésique et tactile est capable de reproduire plusieurs textures larges distinctes. Pour les textures larges simulées par l'effet kinesthésique seul, les résultats montrent qu'elles sont généralement perçues moins larges que les textures larges réelles : elles tendent à sous-estimer l'amplitude ou à sous-estimer la période. Pour les textures larges simulées par l'effet couplé kinesthésique et tactile, la correspondance est meilleure. Ceci signifie que l'effet tactile joue un rôle important pour augmenter le rendu de la simulation de texture large.

D'autre part, il existe un décalage des réponses pour les textures larges avec une grande amplitude ou petite période. Ceci pourrait s'expliquer par la difficulté de simuler des textures très larges par le dispositif lui-même ; cela souligne l'importance que le contrôle en temps réel de l'interface joue un rôle important dans la qualité de la perception.

4.4.3.2 Expérience 2 : comparaison des deux modèles avec la condition réelle à l'aide du JNDs

L'expérience 1 montre que la simulation de texture large est meilleure si l'effet kinesthésique est couplé avec l'effet tactile. Cette expérience est une première évaluation qui compare globalement les deux modèles. Pour comparer les deux modèles au niveau de la discrimination, c'est à dire le plus petit écart de texture décelable, nous conduisons une expérience qui permet de mesurer les seuils différentiels sur les textures larges virtuelles restituées par les deux modèles. Nous mesurons également les seuils différentiels sur les échantillons réels.

a. Les sujets

Huit sujets volontaires ont participé à cette expérience. Le groupe est constitué de 6 hommes et 2 femmes. Aucun des sujets n'avait déjà participé à une étude dans le domaine haptique et concernant la perception de texture large. Ils n'ont pas de callosités, de tissu cicatriciel, ou d'autres signes de dommages à la peau sur le bout des doigts et sont tous droitiers.

b. Stimuli

Les stimuli virtuels sont générés par le dispositif couplé kinesthésique et tactile en employant les deux modèles de rendu de texture large. Quatre séries d'échantillons virtuels dans les mêmes conditions qu'à l'expérience 1 sont simulées. Pour les deux séries avec l'amplitude variable, l'amplitude étalon est de $0.8mm$; les huit échantillons de comparaison sont de $0.4mm$, $0.5mm$, $0.6mm$, $0.7mm$, $0.9mm$, $1.0mm$, $1.1mm$ et $1.2mm$; toutes les périodes sont de $20mm$. Pour les deux séries avec la période variable, la période étalon est de $22mm$; les huit échantillons de comparaison sont de $18mm$, $19mm$, $20mm$, $21mm$, $23mm$, $24mm$, $25mm$ et $26mm$; toutes les amplitudes sont de $1mm$.

Les stimuli réels sont des textures larges à profil sinusoïdal en PVC plastique. Il y a deux séries d'échantillons réels, correspondants aux échantillons virtuels décrits au paragraphe précédent. Tous les échantillons réels sont présentés à la figure 4.13a.

c. Procédure expérimentale

Nous mesurons les seuils différentiels pour les quatre séries d'échantillons virtuels et deux séries d'échantillons réels.

Pour les quatre séries virtuelles : Le protocole expérimental est presque le même

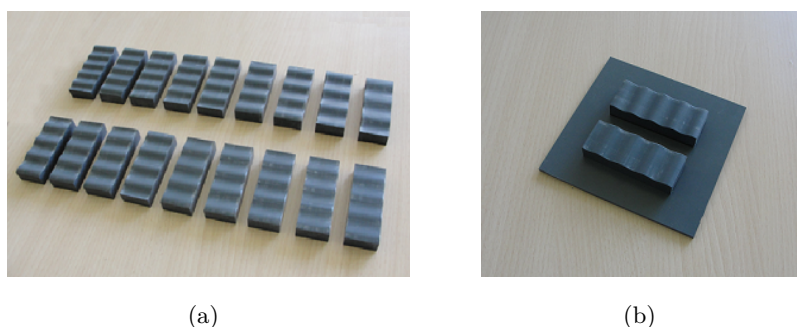


FIGURE 4.13 – a). Les deux séries d'échantillons réels. Pour chaque série, l'un des échantillons est la texture large étalon et les huit autres les textures larges de comparaison. b). Une paire de textures larges réelles présentées aux sujets dont l'une est l'échantillon étalon et l'autre l'échantillon de comparaison.

que celui utilisé dans l'expérience 2 du chapitre 3. Nous employons également la méthode expérimentale “deux alternatives à choix forcé avec stimulus constant” et utilisons l'interface expérimentale pour gérer cette expérience. La tâche à effectuer est de discriminer, entre deux textures larges virtuelles simulées, laquelle possède l'amplitude ou la période la plus grande.

Pour les deux séries réelles : Au cours de l'expérience, dans chaque essai, on présente aux sujets une paire de stimuli : l'une est la texture large réelle étalon et l'autre la texture large réelle de comparaison (Figure 4.13b). L'ordre des stimuli étalon et de comparaison est aléatoire. Les sujets doivent juger laquelle des deux textures possède l'amplitude ou la période la plus grande en répondant “la gauche” ou “la droite”.

Une série de tests est générée dans laquelle toutes les combinaisons sont explorées (quatre séries virtuelles et deux séries réelles). Chaque combinaison de textures larges étalon et de comparaison est répétée 16 fois, ce qui signifie que chaque sujet effectue 768 essais (6 formes étalons dans 6 séries \times 8 comparaisons \times 16 répétitions). L'expérience est divisée en huit sessions qui contiennent chacune 6 blocs. Un bloc est constitué de 16 essais (1 texture large étalon \times 8 comparaisons \times 2 répétitions) dans la même série. L'ordre de présentation des 6 séries ainsi que l'ordre de présentation à l'intérieur des blocs sont aléatoires.

Cette expérience commence par une session d'entraînement qui a pour but de familiariser les sujets avec la tâche demandée. Pendant cette session, des explications détaillées sont données par oral à chaque sujet, pour les sessions suivantes les instructions sont abrégées. Les réponses sont données pendant l'entraînement, mais aucune correction n'est donnée pendant le test.

d. Résultats

Les JNDs pour tous les sujets sont calculés à partir des données brutes. Comme nous voulons comparer les deux modèles au niveau de l'amplitude et de la période, les seuils différentiels sont collectés en deux catégories : l'un pour la discrimination d'amplitude (Figure 4.14) ; l'autre pour la discrimination de période (Figure 4.15). Chaque catégorie comprend les JNDs des séries d'échantillons simulés par l'effet kinesthésique seul et par l'effet couplé kinesthésique et tactile, et de la série d'échantillons réels.

A partir des résultats, nous remarquons que, dans les deux catégories, le seuil différentiel moyen pour la série d'échantillons simulés par l'effet couplé kinesthésique et tactile est supérieur aux autres.

Au niveau de l'amplitude, l'analyse de variance des mesures (ANOVA) montre qu'il y a un effet significatif pour les trois séries ($F_{2,14} = 9.30; p < 0.003$). Le t-test montre une différence significative entre la série simulée par l'effet kinesthésique seul et la série réelle ($t_7 = 4.508; p = 0.003$), ainsi qu'entre la série simulée par le modèle kinesthésique et tactile couplé et la série réelle ($t_7 = 3.387, p = 0.012$). Aucune différence significative n'existe entre les deux séries simulées ($t_7 = 1.248, p = 0.252$).

En ce qui concerne la période, l'analyse d'ANOVA montre aussi qu'il y a un effet significatif pour les trois séries ($F_{2,14} = 7.44; p < 0.007$). Le t-test montre une différence significative entre la série simulée par l'effet kinesthésique et tactile et la série réelle ($t_7 = 3.394; p = 0.012$), ainsi qu'entre les deux séries simulées ($t_7 = 3.529, p = 0.010$). Aucune différence significative n'existe entre la série simulée par l'effet kinesthésique seul et la série réelle ($t_7 = 1.357, p = 0.217$).

e. Discussion

Cette expérience nous permet de comparer les deux modèles de rendu de texture large au niveau de la discrimination. Les résultats montrent que le seuil différentiel moyen pour la série d'échantillons simulés par l'effet couplé kinesthésique et tactile est supérieur à celui pour la série par l'effet kinesthésique seul dans les deux catégories. Le t-test ne montre aucune différence significative entre les deux pour la discrimination de la période, mais une différence significative pour la discrimination d'amplitude. Cela prouve que le couplage tactile n'améliore pas la performance dans la discrimination, voire, la réduit.

4.4.3.3 Discussion générale

Nous avons effectué deux expériences afin d'évaluer le dispositif couplé kinesthésique et tactile ainsi que deux modèles de rendu de texture large. L'expérience 1 a montré que le dispositif

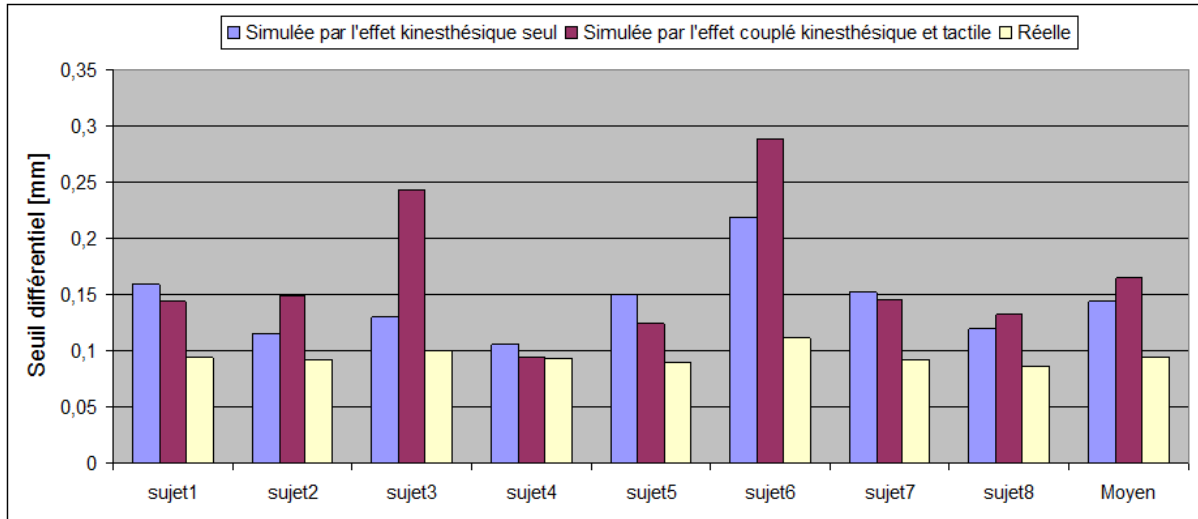


FIGURE 4.14 – Les seuils différentiels pour les huit sujets et le seuil moyen. Ces résultats sont obtenus pour la discrimination d’amplitude.

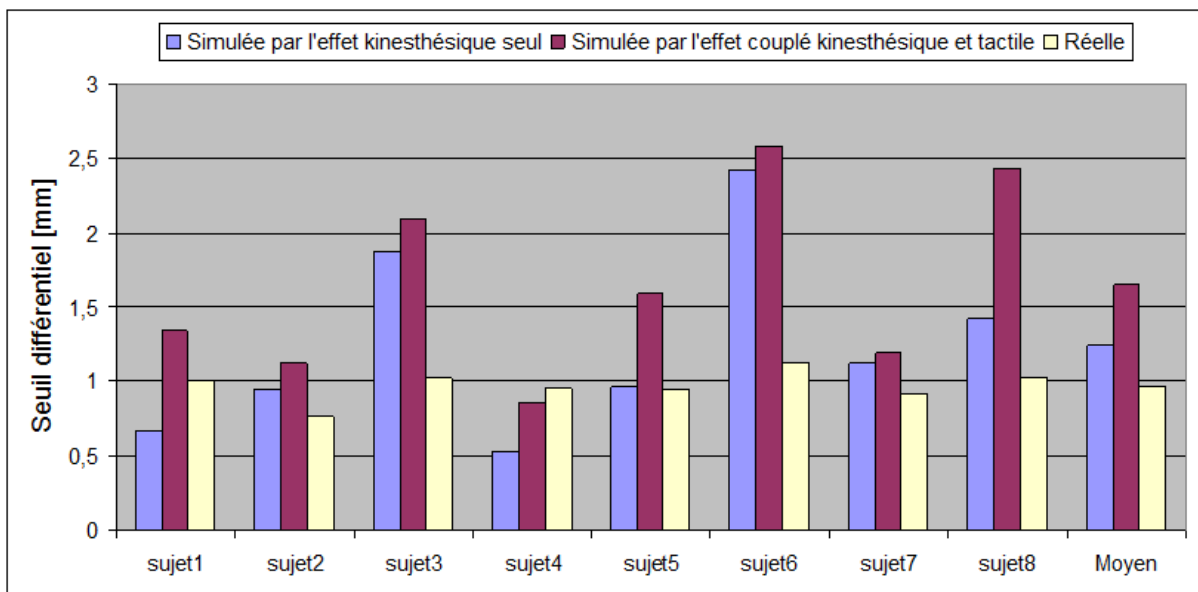


FIGURE 4.15 – Les seuils différentiels pour les huit sujets et le seuil moyen. Ces résultats sont obtenus pour la discrimination de période.

conçu est capable de restituer des textures larges, surtout celles qui ont de petites amplitudes ou de grandes périodes. Les résultats montrent également que l'effet tactile peut améliorer la perception des textures larges.

Toutefois, l'expérience 2 a montré que l'effet tactile n'améliore pas la discrimination. En effet, le seuil différentiel moyen pour les échantillons simulés par l'effet couplé kinesthésique et tactile est supérieur à celui pour les échantillons simulés par l'effet kinesthésique seul. Cela peut peut-être s'expliquer par le retour tactile à la montée qui introduit une vibration sous le doigt due aux passages de l'état glissant à l'état bloquant. Il sera certainement intéressant de tester d'autres motifs tactiles pour voir s'ils sont moins perturbants dans la discrimination de texture large.

4.5 Conclusion du chapitre

Ce dernier chapitre était consacré au couplage kinesthésique et tactile. Comme nous avons travaillé sur le retour kinesthésique dans les chapitres 2 et 3, nous nous sommes penchés dans ce chapitre sur le retour tactile et son couplage.

Dans la première partie nous avons présenté la psychophysique de la rugosité de texture fine et les méthodes permettant d'obtenir des illusions de surfaces texturées. La stimulation vibrotactile à haute fréquence a en effet ouvert la voie à un nouveau type de stimulateurs tactiles qui permet le retour de la sensation de texture par le passage d'un état bloquant à un état glissant. Ce type de stimulateur est généralement une interface continue, l'état glissant étant généré par l'effet "squeeze film".

Dans la seconde partie nous avons conçu une nouvelle plaque tactile à retour de texture fine basée sur les travaux de Biet et al, mais possédant un capteur de position amélioré. En remplaçant la plaque plane dans le dispositif de rendu de forme avec cette plaque tactile, nous obtenons le dispositif couplé kinesthésique et tactile. Ce dispositif nous permet de reproduire simultanément la sensation de forme et la sensation de texture.

Des textures larges ont été simulées dans la dernière partie. Nous l'avons modélisé comme un motif sinusoïdale 1D superposée à une surface plane. Deux modèles de rendu de texture large sont proposés : l'un par l'effet kinesthésique seul et à partir de la perception de la courbure ; l'autre par couplage des effets kinesthésique et tactile, en prenant en compte le motif fin sur la surface de la texture large. Pour finir, deux expériences ont été effectuées pour évaluer le dispositif et comparer les deux modèles. Les résultats montrent que ce dispositif est capable de reproduire des textures larges avec de faibles amplitudes ou de faibles périodes. L'effet tactile peut améliorer la perception des courbures larges, cependant, il n'améliore pas la discrimination dans le test du JND.

Chapitre 5

Conclusion générale

Notre travail visait à concevoir une nouvelle interface qui puisse reproduire la sensation de toucher, au niveau des ressentis kinesthésiques et tactiles. Nous avons tout d'abord construit une plateforme à retour kinesthésique qui nous permet de simuler des formes courbées, ensuite nous avons réalisé une plaque à retour tactile qui nous permet de restituer des textures fines. En insérant cette plaque tactile sur la plateforme, nous avons obtenu le dispositif couplé kinesthésique et tactile qui peut superposer l'information de texture à celle de forme. Comme un premier exemple des possibilités offertes par ce dispositif, nous avons simulé des textures larges.

En premier lieu, pour la compréhension du domaine haptique, nous avons présenté les propriétés du toucher, les sensibilités kinesthésique et tactile, les critères et besoins mais aussi les applications du retour haptique. Cette synthèse très multidisciplinaire nous a permis de nous rendre compte de la complexité du toucher et d'aboutir à une compréhension d'ensemble des mécanismes haptiques. Par la suite, nous avons présenté les systèmes à retour haptique. Une interface haptique est un périphérique informatique qui permet à son utilisateur d'interagir avec une application logicielle ou un objet virtuel par l'intermédiaire du sens du toucher. Comme la sensation haptique est classée en deux catégories, les systèmes à retour haptique peuvent être également classés généralement en deux familles : les systèmes à retour kinesthésique et les systèmes à retour tactile. Cependant, de nombreux dispositifs qui combinent le retour de force et tactile sont émergés dans les dernière années. Pour une reconstitution plus réaliste du toucher, la stimulation simultanée de la modalité kinesthésique et de la modalité tactile est essentielle.

Nous avons exposé des exemples de dispositifs haptiques couplés kinesthésique et tactile dans la littérature internationale en les différenciant d'un point de vue fonctionnel. Nous avons vu que la stimulation de la forme peut être effectuée grâce à l'exploitation du glissement ou par la perception de l'orientation de la surface de l'objet aux points de contact. Quant à la simulation de texture, elle consiste à reproduire des sensations en générant les forces appropriées via des dispositifs tactiles. Ces effecteurs se rangent principalement dans deux catégories : l'une pour

laquelle le doigt est posé de façon passive sur l'interface et ressent l'effet de picots actifs sous le derme (approche discrète), l'autre pour laquelle le doigt explore de façon active une surface plus large dont le coefficient de friction est contrôlable (approche continue). L'adjonction d'un effecteur à retour tactile sur une structure kinesthésique aboutit à un dispositif assurant à la fois le retour tactile et le retour d'effort. Une large gamme de textures peut alors être simulée.

Au deuxième chapitre, nous avons proposé trois modèles de mouvement d'une plaque à retour de forme. Plusieurs études ont prouvé que l'orientation de la surface locale est la principale source d'information pour restituer la forme. Nous respectons cette condition en positionnant une plaque plane de sorte que cette plaque soit toujours tangente au point de contact à une forme virtuelle. En conséquence, le contrôle du mouvement de la plaque joue donc un rôle très important dans la perception de forme.

Pour satisfaire à l'information dominante de la forme, le modèle de mouvement de la plaque avec un degré de liberté de rotation est suffisant. Mais pour prendre en compte la vitesse de la plaque et le profil géométrique de la forme à simuler, nous avons proposé également deux autres modèles de mouvement : le modèle de mouvement avec compensation de la vitesse (trois DDLs) et le modèle de mouvement avec compensation de la position (trois DDLs).

Dans le troisième chapitre, nous avons réalisé la conception du dispositif. Il est composé de quatre parties : une plaque plane qui constitue l'interface homme-machine et sera explorée par le doigt pour la perception de la forme ; un capteur de force pour mesurer la force et le couple appliqués par le doigt au point de contact ; deux *Novint Falcons* pour orienter, élever et déplacer la plaque ; et un ordinateur de bureau pour contrôler les mouvements des deux *Falcons* et calculer la position du doigt à partir des mesures de force et de couple. La commande du système était également présentée.

La question qui nous nous sommes ensuite posée revient à se demander si notre dispositif est capable de reproduire la richesse d'une information de courbure d'une forme et lequel des trois modèles de mouvement est le meilleur. Ceci nous a amenés à effectuer quatre expériences. La première expérience a montré que le dispositif est capable de produire plusieurs formes virtuelles distinctes. La deuxième expérience a mesuré la courbe à peine perceptible pour une référence plate. Le seuil différentiel moyen obtenu dans nos expériences s'est avéré proche des résultats de la littérature. La troisième expérience a comparé les performances des trois modèles de mouvement en mesurant les seuils différentiels. Les résultats ont indiqué que le modèle de mouvement avec compensation de la position est le meilleur, celui pour lequel la fraction de Weber est très proche de celle de la condition réelle. La quatrième expérience a examiné si le dispositif peut afficher une forme qui est vraiment perçue comme étant courbée. Bien que la première expérience ait montré que le dispositif était capable de procurer plusieurs niveaux de perception de la courbure, cette première évaluation n'est pas à notre avis suffisante pour connaître les performances de notre

dispositif. Cela nous a conduits à effectuer cette quatrième expérience. Elle a mesuré le biais de perception en utilisant une forme réelle comme l'échantillon étalon et les formes virtuelles comme échantillons de comparaison. Les résultats ont confirmé que le dispositif employant le modèle du mouvement avec compensation de la position peut afficher une forme virtuelle qui est vraiment perçue comme étant courbée.

Dans le dernier chapitre, nous nous sommes focalisés sur le couplage kinesthésique et tactile. Nous avons conçu une nouvelle plaque tactile basée sur les travaux de Biet et al. Cette interface tactile à frottement variable offre la possibilité de simuler des textures très fines de différentes rugosités et permet de laisser libre cours au mouvement latéral d'exploration du doigt. Il est à noter que nous avons utilisé un capteur de force/couple placé sous la plaque tactile pour calculer la position du doigt, il est donc plus compact que celui de Biet et al. Nous avons ensuite intégré le dispositif kinesthésique et la plaque tactile dans un dispositif couplé kinesthésique et tactile. Ce dispositif nous a permis de reproduire simultanément la sensation de forme et la sensation de texture fine.

Nous avons simulé la texture large à profil d'ondulation dont l'ordre de grandeur des aspérités est le millimètre dans l'amplitude et de quelque 10ème millimètres dans la période en utilisant le dispositif couplé kinesthésique et tactile. La texture large a été modélisée comme un profil 1D sinusoïdal superposé sur une surface plane. Deux modèles pour rendre cette texture large sont proposés : l'un par l'effet kinesthésique à partir de la perception de la courbure ; l'autre par l'effet couplé kinesthésique et tactile en prenant en compte le motif fin sur la surface de la texture large. Les expériences qui ont été menées ont montré que le dispositif est capable de reproduire des textures larges avec des amplitudes et que l'effet tactile peut améliorer la perception de texture large mais n'améliore pas la discrimination de texture large dans le test du JND.

Limites et perspectives

Nous avons construit une plateforme pour orienter, élever et déplacer la plaque tactile. Afin d'avoir une perception correcte de la courbure, il est indispensable d'avoir des exigences dynamiques et de stabilité élevées pour cette plateforme. Il sera donc nécessaire d'améliorer les liaisons mécaniques et les lois de contrôle du système afin que la plaque puisse réagir à la position du doigt plus rapidement et de façon plus stable. En particulier, les jeux mécaniques et les frottements secs devront être pris en compte.

Ce travail serait à mener simultanément avec des investigations vers d'autres cas test du couplage tactile-kinesthésique. Ici, nous nous sommes focalisées sur le retour de textures larges ; nous avons proposé pour cela une méthode de couplage tactile-kinesthésique mais d'autres stratégies

sont certainement à explorer, par exemple, il sera certainement intéressant de tester d'autres motifs tactiles pour améliorer la discrimination. De plus, on peut penser à d'autres cas de simulation pour lesquels l'aspect réaliste sera satisfait par la co-existence des deux retours d'information : par exemple l'exploration d'une surface de type peau d'orange, (surface courbe et texture irrégulière), ou le cas de cordes de guitare (effets tactile et kinesthésique). Nous aimerions également tester les nouvelles possibilités de ce dispositif pour la simulation de tissus : des premiers essais ont été réalisés pour la simulation d'un tissu velours ras, en utilisant le retour tactile seul. L'adjonction d'un dispositif kinesthésique et surtout capable de restituer au doigt une énergie, devrait améliorer la perception du retournement du poil de velours [BGB⁺10].

Enfin, le dispositif conçu propose une exploration unidimensionnelle de l'interface ; le capteur de position pourrait délivrer des informations bidimensionnelles, il faudrait alors rajouter un DDL à l'effecteur final pour qu'il assure la simulation de surfaces sphériques, avec une exploration proximo-distale ou latérale. De nouveaux signaux de modulation nous permettraient alors de simuler des textures plus fines et plus complexes.

Annexe A

Calcul de la vitesse du point de contact

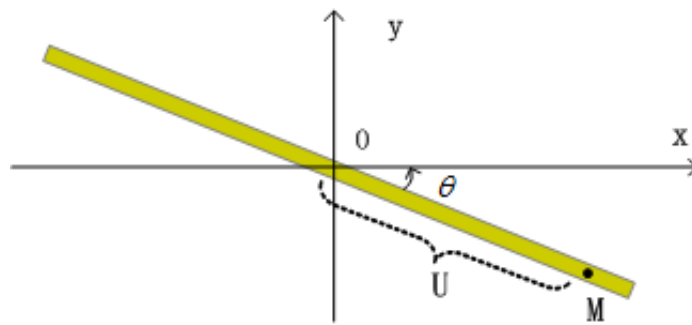


FIGURE A.1 - La plaque dans le système de coordonnées cartésiennes.

La figure A.1 illustre la plaque dans le système de coordonnées cartésiennes, où M est le point de contact sur la plaque. Les coordonnées de M s'écrivent :

$$\overrightarrow{OM} = \begin{bmatrix} U \cdot \cos \theta \\ U \cdot \sin \theta \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

La vitesse est la dérivée de la distance en fonction du temps. Constatez que, pour un certain point M , la distance U est fixée. Alors, au cours de la rotation, seule l'angle θ varie avec le temps. Nous obtenons la vitesse du point de contact par rapport au référentiel fixe :

$$v_M \in plaque = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = U \cdot \begin{bmatrix} -\dot{\theta} \cdot \sin \theta \\ \dot{\theta} \cdot \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Rappelons l'Eq. 2.7 et l'Eq. 2.8, nous avons :

$$\tan = -\frac{8H}{L^2} \cdot R \cdot \sin\left(\frac{U}{R}\right) \quad (\text{A.3})$$

$$\theta = \arctan \left[-\frac{8H}{L^2} \cdot R \cdot \sin\left(\frac{U}{R}\right) \right] \quad (\text{A.4})$$

De l'Eq. A.3 et l'Eq. A.4, nous obtenons :

$$\dot{\theta} = \frac{-\frac{8H}{L^2} \cdot \cos\left(\frac{U}{R}\right) \cdot \dot{U}}{1 + \left[\frac{8H}{L^2} \cdot R \cdot \sin\left(\frac{U}{R}\right) \right]^2} \quad (\text{A.5})$$

$$\sin \theta = \frac{-\frac{8H}{L^2} \cdot R \cdot \sin\left(\frac{U}{R}\right)}{\sqrt{1 + \left[\frac{8H}{L^2} \cdot R \cdot \sin\left(\frac{U}{R}\right) \right]^2}} \quad (\text{A.6})$$

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{8H}{L^2} \cdot R \cdot \sin\left(\frac{U}{R}\right) \right]^2}} \quad (\text{A.7})$$

En remplaçant θ , $\sin \theta$ et $\cos \theta$ de l'Eq. A.2 par ses expressions dans l'Eq. A.5, l'Eq. A.6 et l'Eq. A.7, nous avons la vitesse :

$$v_M \in plaque = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = \begin{bmatrix} \frac{-\left(\frac{8H}{L^2}\right)^2 \cdot \cos\left(\frac{U}{R}\right) \cdot \sin\left(\frac{U}{R}\right) \cdot R \cdot \dot{U} \cdot U}{\left[1 + \left[\frac{8H}{L^2} \cdot R \cdot \sin\left(\frac{U}{R}\right)\right]^2\right]^{\frac{3}{2}}} \\ \frac{-\frac{8H}{L^2} \cdot \cos\left(\frac{U}{R}\right) \cdot \dot{U} \cdot U}{\left[1 + \left[\frac{8H}{L^2} \cdot R \cdot \sin\left(\frac{U}{R}\right)\right]^2\right]^{\frac{3}{2}}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

Annexe B

Calcul de la vitesse du point de contact dans le modèle de mouvement avec compensation de la position

Dans ce modèle, pour chaque point de contact M (M'), sa vitesse propre comporte deux parties : celle qui émane de la rotation et celle qui provient du déplacement en x ou y de la plaque.

Vitesse due à la rotation : Comme indiqué dans l'annexe **A**, pour un certain point de contact M (M'), la distance U est fixée. Alors, au cours de la rotation, seul l'angle θ varie avec le temps. De la même manière que dans l'annexe **A**, nous obtenons :

$$v_M \in plaque = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = U \cdot \begin{bmatrix} -\dot{\theta} \cdot \sin \theta \\ \dot{\theta} \cdot \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

Vitesse due au déplacement x, y : La vitesse du déplacement est donnée par la dérivée de d_0 (voir l'Eq. 2.17) :

$$v_d \in plaque = \dot{d}_0 = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{U}{R}\right) \cdot \dot{U} - \dot{U} \cdot \cos \theta + U \cdot \dot{\theta} \cdot \sin \theta \\ -\frac{8H \cdot R}{L^2} \cdot \sin\left(\frac{U}{R}\right) \cdot \cos\left(\frac{U}{R}\right) \cdot \dot{U} - \dot{U} \cdot \sin \theta - U \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

Finalement, la vitesse du point de contact est la somme des deux partis :

$$v_{M'} \in plaque = v_M + v_d = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{U}{R}\right) \cdot \dot{U} - \dot{U} \cdot \cos \theta \\ -\frac{8H \cdot R}{L^2} \cdot \sin\left(\frac{U}{R}\right) \cdot \cos\left(\frac{U}{R}\right) \cdot \dot{U} - \dot{U} \cdot \sin \theta \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

Annexe C

Présentation graphique des résultats du seuil différentiel

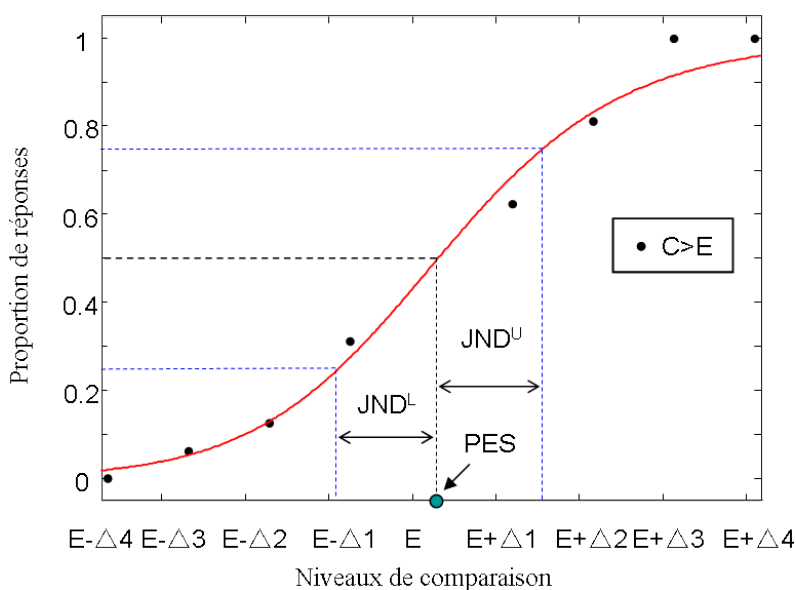


FIGURE C.1 - Présentation graphique des résultats de discrimination.

A chaque essai est présenté en succession un couple de stimuli. L'un est constant pour tous les essais : c'est le stimulus étalon (E). L'autre prend différentes valeurs, plus petites ou supérieures à l'étalon : c'est le stimulus de comparaison (C). Sur un graphique portant en abscisse les valeurs du stimulus de comparaison et en ordonnée les probabilités de chaque réponse, on ajuste la fonction psychométrique (Figure C.1).

Le Point d'Egalisation Subjective (PES) est la valeur du stimulus de comparaison jugée statistiquement égale à celle de l'étalon; autrement dit, la valeur du stimulus de comparaison pour laquelle la fréquence de réponse $C > E$ est de 0.5. Le JND pour le stimulus étalon est

défini comme la moyenne des seuils de différence supérieure et inférieure (JND^U et JND^L). Comme le montre la figure, JND^U est la différence entre 0,75 et 0,50 probabilités de réponse ; JND^L est la différence entre 0,50 et 0,25 probabilités de réponse.

Dans différents domaines de la perception, le seuil différentiel augmente avec le niveau de base de la stimulation (avec le stimulus étalon). Selon la loi de Weber-Fechner, le ratio de ces deux quantités est constant :

$$\frac{JND}{PES} = k \tag{C.1}$$

Où k est une constante dite fraction de Weber.

Bibliographie

- [FBFH07] R. Baavour, M. Fuchs, and U. Ben-Hanan. Grip-slip : A slip/shear tactile display master unit for grip tasks. In *2007 Mediterranean Conference on Control and Automation*, Athens-Greece, July 2007.
- [BGB⁺10] M. Bueno, F. Giraud, R. Bocquet, B. Lemaire-semail, M. Turlonias, R. Rossi, and M. Amberg. Analyse du toucher et simulation de surfaces fibreuses anisotropes a l'aide d'un effecteur : Exemple du velours. In *Journée Française de Tribologie*, Albi (France), 2010.
- [BGLS07] M. Biet, F. Giraud, and B. Lemaire-Semail. Squeeze film effect for the design of an ultrasonic tactile plate. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 54(12) :2678–2688, December 2007.
- [BGVC88] S. J. Bolanowski, G. A. Gescheider, R. T. Verrillo, and C. M. Checkosky. Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *J. Acoust. Soc. AM*, 84(5) :1680–1694, 1988.
- [BH03] S. J. Bensmaia and M. Hollins. The vibrations of texture. *Somatosensory and Motor Research*, 20 :33–43, 2003.
- [Bie06] M. Biet. *Conception et contrôle d'un actionneurs électro-tactifs dédiés à la stimulation tactile*. PhD thesis, USTL, France, 2006.
- [Bou] A. Bouscayrol. La représentation énergétique macroscopique (rem). Technical report, L2EP, [http://l2ep.univ-lille1.fr/fileupload/file/La Représentation Énergétique Macroscopique.pdf](http://l2ep.univ-lille1.fr/fileupload/file/La%20Representation%20Energetique%20Macroscopique.pdf).
- [Bou09] A. Bouscayrol. Hardware-in-the-loop (hil) simulation. Technical report, EVS'24, Stavanger, Norway, 2009.
- [BPIH10] O. Bau, I. Poupyrev, A. Israr, and C. Harrison. Teslatouch : Electrovibration for touch surfaces. In *UIST'10*, New York, USA, October 2010.
- [Bro90] T. L. Brooks. Telerobotic response requirements. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pages 113–120, Los Angeles, CA, 1990.

- [Bro10] W. Frederick Bronaugh. Human-in-the-loop simulation : The right tool for port design. *Port Technology International*, 32 :1–2, 2010.
- [BS96] G. L. Beauregard and M. A. Srinivasan. Sensorimotor inreractions in the haptic perception of virtual objects. Technical Report 607, MIT, Cambridge, MA, 1996.
- [BSR00] A. Bicchi, E. P. Scilingo, and D. D. Rossi. Haptic discrimination of softness in teleoperation : The role of the contact area spread rate. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 16(5), October 2000.
- [BSSR02] A. Bicchi, E. P. Scilingo, N. Sgambelluri, and D. D. Rossi. Haptic interfaces based on magnetorheological fluids. In *Eurohaptics 2002*, 2002.
- [Bur99] G. Burdeahor. Haptic feedback for virtual reality. In *Virtual Reality and Prototyping Workshop*, Laval, France, June 1999.
- [CFM⁺05] G. Cini, A. Frisoli, S. Marcheschi, F. Salsedo, and M. Bergamasco. A novel fingertip haptic device for display of local contact geometry. In *WHC '05 Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 602– 605, March 2005.
- [CJ92] C. E. Connor and K. O. Johnson. Neural coding of tactile texture : Comparison of spatial temporal mechanisms for roughness perception. *The Journal of Neuroscience*, 12(9) :3414–3426, September 1992.
- [Cor93] S. Coren. *The left-hander syndrome : The causes and consequences of left handedness*. Vintage, first edition, 1993.
- [CPCR98] G. Canepa, R. Petrigliano, M. Campanella, and D. D. Rossi. Detection of incipient object slippage by skin-like sensing and neural network processing. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B : Cybernetics*, 28(3) :348–356, Jun 1998.
- [CS01] C. J. Cascio and K. Sathian. Temporal cues contribute to tactile perception of roughness. *The Journal of Neuroscience*, 21(14) :5289–5296, 2001.
- [CT04] S. Choi and Hong Z. Tan. Toward realistic haptic rendering of surface textures. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24(2), March 2004.
- [DDW⁺89] N. I. Durlach, L. A. Delhorne, A. Wong, W. Y. Ko, W. M. Rabinowitz, and J. Hollerbach. Manual discrimination and identification of length by the finger-span method. *Perception and Psychophysics*, 46(1) :29–38, 1989.
- [DGLS06] Z. Dai, F. Giraud, and B. Lemaire-Semail. Force feedback operations with a traveling wave ultrasonic motor. In *Proceeding of International Conference on Eurohaptics*, 2006.

- [DH05] H. Dostmohamed and V. Hayward. Trajectory of contact region on the fingerpad gives the illusion of haptic shape. *Experimental Brain Research*, 164(387-394), 2005.
- [FD] <http://www.forcedimension.com>. Force Dimension.
- [FEB06] M. Fritschi, M. O. Ernst, and M. Buss. Integration of kinesthetic and tactile display—a modular design concept. In *EuroHaptics 2006*, pages 607–612, 2006.
- [FW95] J. R. Flanagan and A. M. Wing. The stability of precision grip forces during cyclic arm movements with a hand-held load. *Experimental Brain Research*, 105 :455–464, 1995.
- [FW97] J. R. Flanagan and A. M. Wing. The role of internal models in motion planning and control : Evidence from grip force adjustments during movements of hand-held loads. *Journal of Neuroscience*, 17 :1519–1528, 1997.
- [Gar10] E. P. Gardner. Touch. In *Encyclopedia of Life Sciences.Published Online*, may 2010.
- [Gib62] J. J. Gibson. Observations on active touch. *Psychological Review*, 69 :477–491, 1962.
- [GM82] I. E. Gordon and V. Morison. The haptic perception of curvature. *Perception and Psychophysics*, 31 :446–450, 1982.
- [Gre04] B. G. Green. Temperature perception and nociception. *Journal of Neurobiology*, 61(1) :13–29, 2004.
- [GS88] D. M. Green and J. A. Swets. *Signal detection theory and psychophysics*. Peninsula Pub, third edition, 1988.
- [GS95] R. J. Gulati and M. A. Srinivasan. Human fingerpad under indentation 1 : static and dynamic force response. In *1995 Bioengineering Conference*, volume 29, pages 261–262, 1995.
- [GSA04] F. Giraud, B. Semail, and J. T. Audren. Analysis and phase control of a piezoelectric traveling-wave ultrasonic motor for haptic stick application. *IEEE Transactions on Industry applications*, 40(6), 2004.
- [GT74] L.H. Goldish and H.E. Taylor. The optacon : A valuable device for blind persons. *New Outlook for the Blind*, pages 49–56, Feb 1974.
- [Hay04] V. Hayward. Display of haptic shape at different scales. In *Eurohaptics 2004, Keynote paper*, number 20-27, Munich Germany, 2004.
- [Hay07] V. Hayward. *Human Haptic Perception-Basics and Applications*, chapter Haptic Shape Cues, Invariants, Priors, and Interface Design, pages 381–392. Birkhauser Verlag, 2007.

- [HBKY00] M. Hollins, S. Bensmaia, K. Karlof, and F. Young. Individual differences in perceptual space for tactile textures : Evidence from multidimensional scaling. *Perception and Psychophysics*, 62 :1534–1544, 2000.
- [HM07] V. Hayward and K. E. Maclean. Do it yourself haptics : part 1. *Robotics and Automation Magazine, IEEE*, 14(4) :88–104, 2007.
- [HS96] C. Ho and M. A. Srinivasan. Human haptic discrimination of thickness. RLE Technical Report 608, MIT, Cambridge, MA, 1996.
- [HSH97] A. Z. Hajian, D. S. Sanchez, and R. D. Howe. Drum roll : Increasing bandwidth through passive impedance modulation. In *Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference*, volume 3, pages 35–36, 1997.
- [IM95] N. W. Hagood IV and A. J. McFarland. Modeling of a piezoelectric rotary ultrasonic motor. *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control*, 42(2) :210–224, March 1995.
- [JH92] K. O. Johnson and S. S. Hsiao. Neural mechanisms of tactual form and texture perception. *Annu. Rev. Neurosci.*, 15 :227–250, 1992.
- [JL83] R. S. Johansson and R. H. LaMotte. Tactile detection thresholds for a single asperity on an otherwise smooth surface. *Somatosensory Research*, 1 :21–31, 1983.
- [Joh01] K. O. Johnson. The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors. *Current Opinon in Neurobiology*, 15(4) :455–461, 2001.
- [JV79] R. S. Johansson and A. B. Vallbo. Detection of tactile stimuli. threshold of afferent units related to psychophysical thresholds in the human hand. *J. Physiol*, 297 :405–422, 1979.
- [JV83] R. S. Johansson and A. B. Vallbo. Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *Trends in Neuroscience*, 6(1) :27–32, 1983.
- [KK96] A. M. L. Kappers and J. J. Koenderink. Haptic unilateral and bilateral discrimination of curved surfaces. *Perception*, 25 :739–749, 1996.
- [KKKS06] K. U. Kyung, S. C. Kim, D. S. Kwon, and M. A. Srinivasan. Texture display mouse kat : Vibrotactile pattern and roughness display. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, October 2006.
- [KL09] K.U. Kyung and J. Y. Lee. Ubi-pen : A haptic interface with texture and vibrotactile display. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 29(1) :56–64, 2009.
- [KOR06] Y. Kim, I. Oakley, and J. Ryu. Combining point force haptic and pneumatic tactile displays. In *EuroHaptics 2006*, pages 309–316, Paris, France, 2006.

-
- [KPNC04] J. Kuchenbecker, W. R. Provancher, K. G. Niemeyer, and M. R. Cutkosky. Haptic display of contact location. In *Proceedings of the Symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, 2004.
- [KSKK04] K. U. Kyung, S. W. Son, D. S. Kwon, and M. S. Kim. Design of an integrated tactile display system. In *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 776–781, New Orleans, LA, April 2004.
- [KTM07] H. Kotani, M. Takasaki, and T. Mizuno. Surface acoustic wave tactile display using a large size glass transducer. In *International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin, China, August 2007.
- [LH03] V. Levesque and V. Hayward. Experimental evidence of lateral skin strain during tactile exploration. In *Eurohaptics 2003*, pages 261–275, 2003.
- [LK87] S. J. Lederman and R. L. Klatzky. Hand movements : A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, 19 :342–368, 1987.
- [LL86] J. Loomis and S. J. Lederman. *Handbook of Perception and Human Performance*, chapter Tactual perception, pages 31–41. Wiley-Interscience, New York : Wiley, 1986.
- [Loo79] J. M. Loomis. An investigation of tactile hyperacuity. *Sensory Processes*, 3 :289–302, 1979.
- [LS91] R. H. LaMotte and M. A. Srinivasan. Surface microgeometry : Neural encoding and perception. *Information Processing in the Somatosensory System*, 1991.
- [LS99] J. C. Liao and M. A. Srinivasan. Experimental investigation of frictional properties of the human fingerpad. *Touch Lab Report, MIT, Cambridge*, 1999.
- [LT72] S. J. Lederman and M. M. Taylor. Fingertip force, surface geometry, and the perception of roughness by active touch. *Perception and Psychophysics*, 12(5) :401–408, 1972.
- [LT01] R.W. Lindeman and J. N. Templeman. Vibrotactile feedback for handling virtual contact in immersive virtual environments. In D. Harris M. J. Smith, G. Salvendy and R. J. Koubek, editors, *Usability, Evaluation and Interface Design : Cognitive Engineering, Intelligent Agents and Virtual Reality*, pages 21–25, Mahwah, New Jersey, 2001.
- [LW86] R. H. LaMotte and J. Whitehouse. Tactile detection of a dot on a smooth surface : peripheral neural events. *Journal of Neurophysiology*, 12(4) :1109–1128, 1986.
- [Mar06] F. Martinot. The influence of surface commensurability on roughness perception with a bare finger. In *EuroHaptics 2006*, pages 21–29, Paris, France, 2006.

- [Mel00] C. Melchiorri. Slip detection and control using tactile and force sensors. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 5(3) :235–243, Sep 2000.
- [MGW⁺05] M. Meng, Y. Ge, Z. Wu, Pi. Fang, and F. Shen. Accuracy of a force sensitive digital tablet in determining the position of force application. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Information Acquisition*, Hong Kong and Macau, China, 2005.
- [Nov] <http://www.novint.com>. Novint Falcon.
- [PAF⁺04] D. Purves, G. J. Augustine, D. Filzpatrick, W. C. Hall, A. S. Lamantia, and J. O. Mcnamara. *Neurosciences*. Sinauer Associates, 2004.
- [PH99] D.T.V. Pawluk and R.D. Howe. Dynamic lumped element response of the human fingerpad. journal of biomechanical engineering. *Journal of Biomechanical Engineering, Transactions of the ASME*, 121 :178–183, 1999.
- [PKK99] S. C. Pont, A. M. L. Kappers, and J. J. Koenderink. Similar mechanisms underlie curvature comparison by static and by dynamic touch. *Perception and Psychophysics*, 61(5) :874–894, 1999.
- [PTD91] X. D. Pang, H. Z. Tan, and N. I. Durlach. Manual discrimination of force using active finger motion. *Perception and Psychophysics*, 49(6) :531–540, 1991.
- [RDLTH01] G. Robles-De-La-Torre and V. Hayward. Force can overcome object geometry in the perception of shape through active touch. *Nature*, 412(6845) :445–448, 2001.
- [SB97] M. A. Srinivasan and C. Basdogan. Haptics in virtual environments : Taxonomy, research status, and challenges. *Comput. and Graphics*, 21(4) :393–404, 1997.
- [SBGB10] E. P. Scilingo, M. Bianchi, G. Grioli, and A. Bicchi. Rendering softness : Integration of kinesthetic and cutaneous information in a haptic device. *IEEE Transactions on Haptics*, 3(2) :109–118, 2010.
- [SBH99] M. A. Srinivasan, C. Basdogan, and C. H. Ho. Haptic interactions in virtual worlds : Progress and prospects. In *In Processing of the International Conference on Smart Materials, Structures, and Systems*, Indian Institute of Science, Bangalore, India, July 1999.
- [SC93] M. A. Srinivasan and J. S. Chen. Human performance in controlling normal forces of contact with rigid objects. In *Advances in Robotics, Mechatronics, and Haptic Interfaces, ASME 1993*, volume 49, New Orleans, CA, 1993.
- [SCVF04] M. Salada, J. E. Colgate, P. Vishton, and E. Frankel. Two experiments on the perception of slip at the fingertip. In *Proceedings of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'04)*, pages 146–153, 2004.

- [Sen] <http://www.sensable.com>. Sensable.
- [SFSB07] M. Solazzi, A. Frisoli, F. Salsedo, and M. Bergamasco. A fingertip haptic display for improving local perception of shape cues. In *Second Joint Eurohaptics Conf. and Symp. Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, World Haptics 2007*, pages 409–414, 2007.
- [SKKT07a] F. Sato, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachil. Electrotactile display for integration with kinesthetic display. In *16th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication.*, pages 3–8, 2007.
- [SKKT07b] F. Sato, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachil. Improvement of shape distinction by kinesthetic-tactile integration. In *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07)*, pages 391–396, March 2007.
- [SMR97] E. R. Serina, C. D. Mote, and D. Rempel. Force response of the fingertip pulp to repeated compression - effects of loading rate. *Journal of Biomechanics*, 30(1) :1035–1040, 1997.
- [SSSS06] S. Shimada, M. Shinohara, Y Shimizu, and M. Shimojo. An approach for direct manipulation by tactile modality for blind computer users : Development of the second trial production. In *ICCHP 2006, LNCS 4061*, pages 1039–1046, 2006.
- [SYU⁺09] S. Shimada, S. Yamamoto, Y. Uchida, M. Shinohara, Y. Shimizu, and M. Shimojo. Development for an interactive communication display for blind computer users. In *The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Toyama, Japan, 2009.
- [SYYM04] Y. Sato, T. Yoshikawa, Y. Yokokohji, and N. Muramori. Designing an encountered-type haptic display for multiple fingertip contacts based on the observation of human grasping behavior. In *Proceedings of the Symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, 2004.
- [TAN⁺05] K. Takekata, M.S.B. Azmi, H. Nishino, T. Kagawa, and K. Utsumiya. An intuitive optimization method of haptic rendering using interactive evolutionary computation. In *2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, volume 2, pages 1896–1901, 2005.
- [TC93] M. R. Tremblay and M. R. Cutkosky. Estimating friction using incipient slip sensing during a manipulation task. In *Proceedings of 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 429–434, May 1993.

- [TDBS95] H. Z. Tan, N. I. Durlach, G. L. Beauregard, and M. A. Srinivasan. Manual discrimination of compliance using active pinch grasp : the roles of force and work cues. *Perception and Psychophysics*, 57(4) :495–510, 1995.
- [TDT05] V. Tannan, R. G. Dennis, and M. Tommerdahl. Stimulus-dependent effects on tactile spatial acuity. *Behavioral and Brain Functions*, 2005.
- [THC05] N. G. Tsagarakis, T. Horne, and D. G. Caldwell. Slip aestheasis : A portable 2d slip/skinstretch display for the fingertip. In *Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2005.
- [TSEC94] H. Z. Tan, M. A. Srinivasan, B. Eberman, and B. Cheng. Human factors for the design of force-reflecting haptic interfaces. In *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, volume 55, pages 353–359, 1994.
- [TSO02] M. Tada, T. Shibata, and T. Ogasawara. Investigation of the touch processing model in human grasping based on the stick ratio within a fingertip contact interface. In *2002 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, volume 5, 2002.
- [Ver71] R. T. Verrillo. Vibrotactile thresholds measured at the finger. *Perception and Psychophysics*, 9 :329–330, 1971.
- [VJ84] A. B. Vallbo and R. S. Johansson. Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand. *Human Neurobiology*, 3(1) :3–14, 1984.
- [WF95] T. Watanabe and S. Fukui. A method for controlling tactile sensation of surface roughness using ultrasonic vibration. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1134–1139, 1995.
- [WGCP07] L. Winfield, J. Glassmire, J. E. Colgate, and M. Peshkin. T-pad : Tactile pattern display through variable friction reduction. In *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07)*, 2007.
- [WH06] Q. Wang and V. Hayward. Compact, portable, modular, high-performance, distributed tactile transducer device based on lateral skin deformation. In *2006 Symposium on Haptic Interfaces For Virtual Environment And Teleoperator Systems*, pages 67–72, March 2006.
- [Wie11] M. Wiertelwski. *Conception d'interfaces tactiles pour la perception du glissement et de la rugosité en réalité virtuelle*. PhD thesis, UPMC, France, 2011.

- [WMVO05] R. J. Webster, T. E. Murphy, L. N. Verner, and A. M. Okamura. A novel two-dimensional tactile slip display : design, kinematics and perceptual experiments. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2(2) :150–165, April 2005.
- [WPF⁺05] C. R. Wagner, D. P. Perrin, R. L. Feller, R. D. Howe, O. Clatz, H. Delingette, and N. Ayache. Integrating tactile and force feedback with finite element models. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, April 2005.
- [WSHK09] M. W. A. Wijntjes, A. Sato, V. Hayward, and A. M. L. Kappers. Local surface orientation dominates haptic curvature discrimination. *IEEE Transaction on Haptics*, 2(2) :94–102, 2009.
- [WSKH08] M. W. A. Wijntjes, A. Sato, A. M. L. Kappers, and V. Hayward. Haptic perception of real and virtual curvature. In *EuroHaptics 2008, LNCS 5024*, pages 361–366, 2008.
- [YGD⁺01] T. Yoshioka, B. Gibb, A. K. Dorsch, S. S. Hsiao, and K. O. Johnson. Neural coding mechanisms underlying perceived roughness of finely textured surfaces. *Journal of Neuroscience*, 21(17) :6905–6916, 2001.
- [YKSK07] G. H. Yang, K. U. Kyung, M. A. Srinivasan, and D. S. Kwon. Development of quantitative tactile display device to provide both pin- array-type tactile feedback and thermal feedback. In *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07)*, 2007.
- [ZGLSA10] T. Zeng, F. Giraud, B. Lemaire-Semail, and M. Amberg. Analysis of a new haptic display coupling tactile and kinesthetic feedback to render texture and shape. In *EuroHaptics 2010*, pages 87–93. Part II, LNCS 6192, 2010.
- [ZGLSA11] T. Zeng, F. Giraud, B. Lemaire-Semail, and M. Amberg. Haptic perception of curvature through active touch. In *IEEE World Haptics Conference 2011*, pages 533–538, Istanbul, Turkey, June 2011.

Résumé

Titre : Conception et Contrôle d'un périphérique dédié à la simulation couplée kinesthésique et tactile.

Dans le domaine de la réalité virtuelle, la mise en situation écologique des utilisateurs nécessite l'utilisation d'interfaces homme-machine capables de transmettre mais aussi restituer des informations réalistes. L'objectif de cette thèse est de réaliser une interface haptique capable de reproduire des retours d'informations kinesthésiques et tactiles, c'est à dire la reproduction des sensations de toucher virtuel. Plus précisément, ce travail vise à reproduire simultanément la forme et la texture. Pour cela nous avons réalisé un dispositif basé sur une plateforme kinesthésique capable de retourner la forme et sur une dalle tactile capable de retourner la texture. Le retour de forme est essentiellement basé sur la restitution de la courbure par l'exploration d'une surface continue, qui peut s'orienter, s'élever et se translater tout en restant toujours tangente à une forme virtuelle au point de contact ; ceci afin de respecter la principale source d'information dans la perception de forme, l'orientation de la surface locale. Quant au retour de texture, pour le réaliser, nous intégrons au dispositif une plaque tactile à frottement variable et contrôlé, développée au L2EP. Une série d'évaluations psychophysiques ont été effectuées de façon à connaître les performances de ce stimulateur couplé kinesthésique et tactile.

Mots-clés : Haptique, kinesthésique, tactile, couplage kinesthésique et tactile, retour de forme, retour de texture.

Abstract

Title : Design and Control of a device coupling of kinaesthetic and tactile feedback.

In the field of virtual reality, the improvement of the user immersion requires the use of human-machine interfaces capable of transmitting but also rendering the realistic information. The objective of this PhD is to develop a haptic device which can reproduce the kinaesthetic and tactile feedbacks, which is the reproduction of virtual touch sensations. Precisely, this work aims to simultaneously simulate the shape and the texture. For this purpose, we have designed a kinaesthetic platform to simulate the shape and a tactile plate to simulate the texture, and then integrated them in a compact device. For the simulation of shape, we proposed to render the curvature of shape by exploring a continuous surface that can be orientated, be elevated and be translated while always remaining tangent to a virtual shape at the contact point, in order to respect the principal source of information in the perception of shape (the orientation of the local surface). For the simulation of texture, we integrated a tactile plate developed in L2EP, which provides variable and controlled friction. Finally, we integrated the platform and the tactile plate in a device coupling kinaesthetic and tactile feedbacks that allows us to simultaneously reproduce the sensations of shape and fine texture. Several evaluations have also been performed to know the performance of the device.

Keywords : haptic, kinaesthetic, tactile, coupling of kinaesthetic and tactile, render of shape, render of texture.